



Markus Maurer · J. Christian Gerdes  
Barbara Lenz · Hermann Winner *Hrsg.*

# Autonomes Fahren

Technische, rechtliche  
und gesellschaftliche Aspekte

Gefördert durch die:

**Daimler** und  
**Benz** **Stiftung**

 **Springer** Open

---

# Autonomes Fahren

---

Markus Maurer • J. Christian Gerdes • Barbara Lenz  
Hermann Winner (Hrsg.)

# Autonomes Fahren

Technische, rechtliche und gesellschaftliche  
Aspekte

*Herausgeber*

Markus Maurer  
TU Braunschweig, Institut für Regelungstechnik,  
Deutschland

J. Christian Gerdes  
Stanford University, Stanford, USA

Barbara Lenz  
DLR Berlin, Humboldt-Universität zu Berlin,  
Deutschland

Hermann Winner  
Technische Universität Darmstadt, Darmstadt,  
Deutschland

Gefördert durch die Daimler und Benz Stiftung

**Daimler und  
Benz Stiftung**

ISBN 978-3-662-45853-2

ISBN 978-3-662-45854-9 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-662-45854-9

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© The Editors and the Authors 2015. The book is published with open access at SpringerLink.com

**Open Access** This book is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Noncommercial License which permits any noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author(s) and source are credited.

Jede kommerzielle Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Die Umschlagabbildung stammt aus Kapitel 2 „Use-Cases des autonomen Fahrens“

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media  
([www.springer.com](http://www.springer.com))

---

## Geleitwort

Vieles deutet darauf hin: Wir stehen am Vorabend einer weiteren mobilen Revolution. In Zukunft werden autonome Fahrzeuge aktiv am Straßenverkehr teilnehmen. Die dafür notwendigen Daten generieren sie mithilfe von Kameras bzw. Sensoren, die vom Rechner in Echtzeit innerhalb von Sekundenbruchteilen verarbeitet werden. Außerdem tauschen die Fahrzeuge untereinander sowie mit der Verkehrsinfrastruktur permanent Informationen aus. Dem Autofahrer werden sukzessive mehr und mehr Aufgaben durch Fahrroboter abgenommen.

Die technologische Perspektive des autonomen Fahrens ist gleichwohl nur eine Seite der Medaille. Ebenso werden autonome Fahrzeuge mittelbare Wirkungen auf unsere Gesellschaft haben, die wir gegenwärtig nur erahnen können. Zahlreiche kritische Fragen drängen sich auf: Wie wird es um das Thema Datensicherheit bestellt sein? Wie werden wir mit weitreichenden Eingriffen in unsere mobile Autonomie umgehen? Welche Probleme ergeben sich, wenn ein autonomes Fahrzeug Ländergrenzen überschreitet? In welcher Form haften künftig Versicherungen bei Unfällen durch autonome Fahrzeuge? Oder umgekehrt gefragt: Dürfen wir überhaupt noch Menschen ans Steuer lassen, sollten Fahrroboter die Sicherheit im Straßenverkehr nachweislich erhöhen?

Die Daimler und Benz Stiftung schätzt die gesellschaftliche Dimension dieser Veränderungen als zumindest ebenso gravierend ein wie die technologische. Innovative Technologien allein genügen nicht, um diese Entwicklungen zu gestalten und das automatisierte Fahren in unserer Gesellschaft zu verwirklichen. Deshalb sind wir gut beraten, uns solchen Fragen bereits heute zu stellen und diesen tiefgreifenden Wandel in der Mobilität nicht einfach als gegeben hinzunehmen, ihn auf uns „zurollen“ zu lassen. Um die ethischen, sozialen, juristischen, psychologischen oder verkehrstechnischen Rahmenbedingungen dieses Prozesses auszuleuchten, hat die Daimler und Benz Stiftung Wissenschaftler aus verschiedenen Fachbereichen gebeten, sich des Themas anzunehmen.

Das Kernteam des Projekts – Markus Maurer, Barbara Lenz, Hermann Winner und J. Christian Gerdes – identifizierte die aus seiner Sicht derzeit akuten Fragestellungen. Gleichzeitig etablierten die vier Wissenschaftler ein internationales Netzwerk aus renommierten Spezialisten, die ihre Sicht und ihre Erfahrungen in das Gespräch mit einbrachten. Das nun vorliegende Ergebnis, ein „Weißbuch“, analysiert die bereits erkennbaren Ent-

wicklungen aus interdisziplinärer Sicht. Es ist das vorläufige Resultat eines groß angelegten Förderprojekts: Unter dem Namen „Autonomes Fahren – Villa Ladenburg“ wurde es durch die Daimler und Benz Stiftung über einen Zeitraum von rund zwei Jahren mit einem Budget von 1,5 Millionen Euro ausgestattet. Unser erklärtes Ziel ist es, mit den vorliegenden Erkenntnissen eine objektive und unabhängige Informationsquelle zur Verfügung zu stellen.

Dieses Sondieren des Themas aus interdisziplinärer Perspektive halten wir für unverzichtbar. Im vorliegenden Band versuchen die Autoren deshalb eine erste umfassende Darstellung dessen, was wir zum gegenwärtigen Zeitpunkt als wissenschaftlich aussagbar erachten dürfen. Gleichzeitig müssen die noch schwer greifbaren neuen Technologien für potenzielle Nutzer wie für Betroffene erfahrbar gemacht werden. Solcherart entwickelt sich für viele Menschen eine Vorstellung, was sie erwarten können und was Technik überhaupt leisten kann – aber auch, was sie nicht wird leisten können.

Bereits jetzt wird deutlich, dass drei Aspekte in den Vordergrund treten: Zum einen wird ethischen Fragen eine Klammerfunktion zukommen. Erst wenn es gelingt, autonom agierenden Fahrzeugen eine Art von Entscheidungsethik mitzugeben, vermag sich die Fahrrobotik auch in der Praxis zu behaupten. Dies gilt insbesondere für sogenannte Dilemma-Situationen, in denen eine Abwägung getroffen werden muss, welches Verhalten im Falle einer unvermeidbaren Kollision den beteiligten Personen innerhalb und außerhalb des Fahrzeugs den geringsten Schaden zufügt. Eine weitere ungeklärte Schlüsselfrage ist, welche Konsequenzen hieraus für die Gesetzgebung (z. B. die Straßenverkehrsordnung) resultieren könnten.

Ein weiterer Aspekt betrifft die Leistungsfähigkeit der maschinellen Wahrnehmung. Diese stößt aktuell an verschiedene Grenzen: Sensoren, Kameras oder zusammengesetzte Komponenten degenerieren und büßen im Lauf der Zeit an Zuverlässigkeit ein. Zwar ist es möglich, Zustandsunsicherheiten abzuschätzen und darüber die Leistungsfähigkeit der maschinellen Wahrnehmung zu prüfen. Doch werden Ausfälle tatsächlich vorhersagbar sein? Und wie wäre der sichere Zustand einer autonomen Maschine unter allen denkbaren Umständen überhaupt zu definieren? Dieser Aspekt kann sogar noch deutlich weiter gefasst werden – Stichwort Robotifizierung. Schließlich erreichen die hier spezifisch aufgeworfenen Fragestellungen in einer tiefergehenden Form ausnahmslos alle Lebensbereiche des Alltags, in denen autonome Maschinensysteme genutzt werden. Auch hier gilt es, Bedingungen zu analysieren und Konsequenzen zu antizipieren.

Nicht zuletzt kann das automatisierte Fahren ganz neue Chancen eröffnen, aber auch negative Folgeerscheinungen mit sich bringen. Einer Reduzierung bzw. Verlagerung des Parkraumbedarfs in der Innenstadt und einer effizienteren Ausnutzung von Verkehrsflächen im fließenden Verkehr stünde durch die Kompensation von Standortnachteilen am Stadtrand eine neue Suburbanisierungswelle gegenüber.

Diese Publikation soll im Sinne unseres Stiftungszwecks zur Antizipation und Anregung künftiger Diskurse beitragen und so einen gesamtgesellschaftlichen Mehrwert erzielen. Das Buch soll Vertretern von Politik und Wirtschaft, Medien und Forschung sowie der interessierten Öffentlichkeit eine wissenschaftliche Grundlage an die Hand geben. Auf dieser Basis kann schließlich eine eigenständige und kompetente Auseinandersetzung mit den diversen Fragestellungen und Rahmenbedingungen des autonomen Fahrens erfolgen.

Prof. Dr. Eckard Minx  
Vorsitzender des Vorstands

Prof. Dr. Rainer Dietrich  
Mitglied des Vorstands

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> . . . . .	<b>1</b>
	<i>Markus Maurer</i>	
<b>2</b>	<b>Use-Cases des autonomen Fahrens</b> . . . . .	<b>9</b>
	<i>Walther Wachenfeld, Hermann Winner, Chris Gerdes, Barbara Lenz, Markus Maurer, Sven Beiker, Eva Fraedrich, Thomas Winkle</i>	

## **Teil I Human and Machine**

*J. Christian Gerdes*

<b>3</b>	<b>Das automatisierte Fahren im gesellschaftsgeschichtlichen und kulturwissenschaftlichen Kontext</b> . . . . .	<b>41</b>
	<i>Fabian Kröger</i>	
<b>4</b>	<b>Why Ethics Matters for Autonomous Cars</b> . . . . .	<b>69</b>
	<i>Patrick Lin</i>	
<b>5</b>	<b>Implementable Ethics for Autonomous Vehicles</b> . . . . .	<b>87</b>
	<i>J. Christian Gerdes, Sarah M. Thornton</i>	
<b>6</b>	<b>Wechselwirkung Mensch und autonomer Agent</b> . . . . .	<b>103</b>
	<i>Ingo Wolf</i>	
<b>7</b>	<b>Kommunikationsprobleme zwischen autonomen Fahrzeugen und menschlichen Fahrern</b> . . . . .	<b>127</b>
	<i>Berthold Färber</i>	

## **Teil II Mobilität**

*Barbara Lenz, Eva Fraedrich*

<b>8</b>	<b>Autonomous Driving – Political, Legal, Social, and Sustainability Dimensions</b> . . . . .	<b>151</b>
	<i>Miranda A. Schreurs, Sibyl D. Steuwer</i>	



<b>9</b>	<b>Neue Mobilitätskonzepte und autonomes Fahren: Potenziale der Veränderung</b> . . . . .	175
	<i>Barbara Lenz, Eva Fraedrich</i>	
<b>10</b>	<b>Einführungsszenarien für höhergradig automatisierte Straßenfahrzeuge</b>	197
	<i>Sven Beiker</i>	
<b>11</b>	<b>Autonomes Fahren und Stadtstruktur</b> . . . . .	219
	<i>Dirk Heinrichs</i>	
<b>12</b>	<b>Autonome Fahrzeuge und autonomes Fahren aus Sicht der Nachfragemodellierung</b> . . . . .	241
	<i>Rita Cyganski</i>	
<b>13</b>	<b>Auswirkungen des autonomen Fahrens auf das Fahrzeugkonzept</b> . . . . .	265
	<i>Hermann Winner, Walther Wachenfeld</i>	
<b>14</b>	<b>Implementierung eines selbstfahrenden und individuell abrufbaren Personentransportsystems</b> . . . . .	287
	<i>Sven Beiker</i>	
 <b>Teil III Verkehr</b>		
	<i>Bernhard Friedrich</i>	
<b>15</b>	<b>Steuerung und Management in einem Verkehrssystem mit autonomen Fahrzeugen</b> . . . . .	313
	<i>Peter Wagner</i>	
<b>16</b>	<b>Verkehrliche Wirkung autonomer Fahrzeuge</b> . . . . .	331
	<i>Bernhard Friedrich</i>	
<b>17</b>	<b>Sicherheitspotenzial automatisierter Fahrzeuge: Erkenntnisse aus der Unfallforschung</b> . . . . .	351
	<i>Thomas Winkle</i>	
<b>18</b>	<b>Autonome Fahrzeuge und autonomes Fahren im Bereich des Gütertransportes</b> . . . . .	377
	<i>Heike Flämig</i>	
<b>19</b>	<b>Autonomous Mobility-on-Demand Systems for Future Urban Mobility</b> .	399
	<i>Marco Pavone</i>	
 <b>Teil IV Sicherheit</b>		
	<i>Hermann Winner, Markus Maurer</i>	
<b>20</b>	<b>Prädiktion von maschineller Wahrnehmungsleistung beim automatisierten Fahren</b> . . . . .	419
	<i>Klaus Dietmayer</i>	

---

<b>21 Die Freigabe des autonomen Fahrens</b> . . . . .	439
<i>Walther Wachenfeld, Hermann Winner</i>	
<b>22 Lernen autonome Fahrzeuge?</b> . . . . .	465
<i>Walther Wachenfeld, Hermann Winner</i>	
<b>23 Sicherheitskonzept für autonome Fahrzeuge</b> . . . . .	489
<i>Andreas Reschka</i>	
<b>24 Erhebung und Nutzbarmachung zusätzlicher Daten – Möglichkeiten und Risiken</b> . . . . .	515
<i>Kai Rannenber</i>	
<b>Teil V Recht und Haftung</b>	
<i>Tom Michael Gasser</i>	
<b>25 Grundlegende und spezielle Rechtsfragen für autonome Fahrzeuge</b> . . .	543
<i>Tom Michael Gasser</i>	
<b>26 Product Liability Issues in the U.S. and Associated Risk Management</b> . .	575
<i>Stephen S. Wu</i>	
<b>27 Regulation and the Risk of Inaction</b> . . . . .	593
<i>Bryant Walker Smith</i>	
<b>28 Entwicklungs- und Freigabeprozess automatisierter Fahrzeuge: Berücksichtigung technischer, rechtlicher und ökonomischer Risiken</b> . .	611
<i>Thomas Winkle</i>	
<b>Teil VI Akzeptanz</b>	
<i>Barbara Lenz, Eva Fraedrich</i>	
<b>29 Gesellschaftliche und individuelle Akzeptanz des autonomen Fahrens</b> . .	639
<i>Eva Fraedrich, Barbara Lenz</i>	
<b>30 Gesellschaftliche Risikokonstellation für autonomes Fahren – Analyse, Einordnung und Bewertung</b> . . . . .	661
<i>Armin Grunwald</i>	
<b>31 Vom (Mit-)Fahren: autonomes Fahren und Autonutzung</b> . . . . .	687
<i>Eva Fraedrich, Barbara Lenz</i>	
<b>32 Marktauswirkungen des automatisierten Fahrens</b> . . . . .	709
<i>David M. Woisetschläger</i>	

---

# Mitarbeiterverzeichnis

**Sven A. Beiker, Dr.-Ing.** formerly Stanford University, Center for Automotive Research at Stanford, Palo Alto, CA 94304, USA

**Rita Cyganski, Dipl.-Geogr.** Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Institut für Verkehrsforschung, 12489 Berlin, Deutschland

**Klaus Dietmayer, Prof. Dr.-Ing.** Universität Ulm, Institut für Mess-, Regel- und Mikro-technik, 89081 Ulm, Deutschland

**Berthold Färber, Prof. Dr.** Universität der Bundeswehr München, 85577 Neubiberg, Deutschland

**Heike Flämig, Prof. Dr.-Ing.** Technische Universität Hamburg-Harburg, Institut für Verkehrsplanung und Logistik, 21071 Hamburg, Deutschland

**Eva Fraedrich, M.A.** Humboldt-Universität zu Berlin, Geographisches Institut, 10099 Berlin, Deutschland

**Bernhard Friedrich, Prof. Dr.-Ing.** Technische Universität Braunschweig, Institut für Verkehr und Stadtbauwesen, 38092 Braunschweig, Deutschland

**Tom Michael Gasser, Ass. Jur.** Bundesanstalt für Straßenwesen, 51427 Bergisch Gladbach, Deutschland

**J. Christian Gerdes, Prof. Dr.** Stanford University, Dept. of Mechanical Engineering Center for Automotive Research at Stanford, Stanford CA 94305, USA

**Armin Grunwald, Prof. Dr.** Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS), Karlsruher Institut für Technologie – KIT – Campus Nord, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Deutschland

**Dirk Heinrichs, Prof. Dr.-Ing.** Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Verkehrsforschung, 12489 Berlin, Deutschland

**Fabian Kröger, M.A.** CNRS, ENS, Université Paris I Panthéon-Sorbonne, Institut d'histoire moderne et contemporaine (IHMC), Equipe d'histoire des techniques, 75004 Paris, Frankreich

**Barbara Lenz, Prof. Dr.** Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Verkehrsforschung, 12489 Berlin, Deutschland

**Patrick Lin, Dr.** Morro Bay, California Polytechnic State University, Philosophy Department, California 93442, USA

**Markus Maurer, Prof. Dr.-Ing.** TU Braunschweig, Institut für Regelungstechnik, Deutschland

**Marco Pavone, Prof. Dr.** Stanford University, Department of Aeronautics and Astronautics, Stanford CA 94305-4035, USA

**Kai Rannenber, Prof. Dr.** Goethe-Universität Frankfurt, Deutsche Telekom Chair of Mobile Business and Multilateral Security, 60629 Frankfurt am Main, Deutschland

**Andreas Reschka, M.Sc.** Technische Universität Braunschweig, Institut für Regelungstechnik, 38106 Braunschweig, Deutschland

**Miranda Schreurs, Prof. Dr.** Freie Universität Berlin, Forschungszentrum für Umweltpolitik, 14195 Berlin, Deutschland

**Bryant Walker Smith, Prof. Dr. J.D., LL.M.** University of South Carolina, School of Law, Columbia, SC 29208, USA

**Sibyl D. Steuer, Dr.** Freie Universität Berlin, Forschungszentrum für Umweltpolitik, 14195 Berlin, Deutschland

**Sarah M. Thornton, M.Sc.** Stanford University, Dept. of Mechanical Engineering, Center for Automotive Research at Stanford, Stanford CA 94305, USA

**Walther Wachenfeld, Dipl.-Ing.** Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Fahrzeugtechnik – FZD, 64287 Darmstadt, Deutschland

**Peter Wagner, Prof. Dr.** Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Verkehrssystemtechnik, 12489 Berlin, Deutschland

**Thomas Winkle, Dipl.-Ing. MBA** Technische Universität München – TUM, Maschinenwesen, Lehrstuhl für Ergonomie, 85747 Garching, Deutschland

**Hermann Winner, Prof. Dr.** Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Fahrzeugtechnik – FZD, 64287 Darmstadt, Deutschland

**David Woisetschläger, Prof. Dr.** TU Braunschweig, Institut für Automobilwirtschaft und Industrielle Produktion, 38106 Braunschweig, Deutschland

**Ingo Wolf, Dipl.-Psych.** Freie Universität Berlin, Institut Futur, 14195 Berlin, Deutschland

**Stephen S. Wu, Esq., J.D.** Los Altos, CA 94022, USA

Markus Maurer

## Inhaltsverzeichnis

<b>1.1 Was ist autonomes Fahren?</b> .....	2
<b>1.2 Autonomes Fahren – Motivatoren in der Forschung</b> .....	4
<b>1.3 Gliederung des Buches</b> .....	5
<b>1.4 Arbeit im Projekt</b> .....	6
<b>Literatur</b> .....	8

Autonomes Fahren wird heute in den Medien engagiert, gelegentlich auch sehr emotional diskutiert. Die Debatte wird angeheizt durch Erfolgsmeldungen von Automobilherstellern, Systempartnern und Unternehmen, deren Geschäftsmodelle bislang in anderen Bereichen liegen. Noch im Jahr 2011, in der Definitionsphase des Projektes „Autonomes Fahren – Villa Ladenburg“, das auch das vorliegende Buch ermöglicht hat, war nicht abzusehen, wie präsent das Thema in der öffentlichen Diskussion zu Projektende drei Jahre später sein würde.

Gemäß der Zielsetzung der Daimler und Benz Stiftung will das Projekt die Diskussion zu einem technischen Thema mit großer gesellschaftlicher Bedeutung anregen. Es wäre unbescheiden und sachlich falsch, die wachsende Diskussion auf das Konto dieses Förderprojektes zu verbuchen, wo doch gleichzeitig mehrere weltweit führende Konzerne sich mit ihren Forschungs- und Öffentlichkeitsabteilungen in einem für sie zukunftsweisenden Technologiefeld zu positionieren versuchen. Allerdings hat die öffentliche Diskussion

---

M. Maurer (✉)  
TU Braunschweig, Institut für Regelungstechnik, Deutschland  
maurer@ifr.ing.tu-bs.de

entscheidende Impulse durch das Förderprojekt erhalten, auch wenn der Zusammenhang nicht immer auf Anhieb erkennbar wurde.

Unbestritten hat die Daimler und Benz Stiftung hervorragendes Gespür bewiesen und zur rechten Zeit dieses Projekt angestoßen: Gerade weil autonomes Fahren derzeit so viel Aufmerksamkeit erfährt, erscheint es den Herausgeberinnen und Herausgebern dieses Buches ein gut gewählter Zeitpunkt, einen möglichst ganzheitlichen Blick auf das Thema zu wagen. Für diese Diskussion haben Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler verschiedener Disziplinen die Aufgabe angenommen, ihre Sicht auf das autonome Fahren verständlich für den Kreis der interessierten Öffentlichkeit zu formulieren und dadurch viele relevante Aspekte in die Diskussion einzubringen.

Als Wissenschaftler bewegen wir uns dabei auf ungewohntem Terrain: Wir sprechen gleichermaßen das Fachpublikum, potenzielle Stakeholder und die interessierte Öffentlichkeit an. Natürlich kann dieses Buch nicht alle Wünsche befriedigen. Zur vertiefenden Lektüre sei daher bereits an dieser Stelle auf die ebenfalls entstehenden Fachartikel der Projektbeteiligten in den einschlägigen Zeitschriften und Konferenzbänden ihrer jeweiligen Fachbereiche verwiesen. Auch wird die Stiftung begleitend zu diesem Band Publikationen fördern, die die Kernthesen des Buches noch stärker zusammenfassen und in Alltagssprache übersetzen.

---

## 1.1 Was ist autonomes Fahren?

Bereits der oberflächliche Blick auf die aktuelle öffentliche Debatte des autonomen Fahrens zeigt, dass es kein einheitliches Begriffsverständnis gibt. Um eine gewisse Konvergenz im Begriffsverständnis zum autonomen Fahren unter den Akteuren im Projekt zu erzeugen, wurden zu Beginn des Projektes sehr subjektiv ausgewählte Definitionen angeboten. Veranschaulicht wurden diese Definitionen durch detailliert beschriebene Anwendungsfälle (s. Kap. 2). Bei aller Subjektivität seien auch diese Definitionen hier dokumentiert.

Seit Jahrzehnten kursiert unter den Pionieren im Bereich des autonomen Fahrens ein Wortspiel mit dem Wort Automobil: Bei der Erfindung des Autos wurde durch die Begriffsbildung „Automobil“ mit dem griechischen *autòs* („selbst, persönlich, eigen“) und dem lateinischen *mobilis* („beweglich“) [1] das „Selbstbewegliche“ betont. Es überwog die Freude daran, dass der Fahrer ohne Unterstützung von Pferden mobil wird. Nicht gewürdigt wurde in dieser Begriffsbildung, dass beim Automobil durch die fehlenden Pferde auch eine gewisse Form von Autonomie des Gefährts verloren ging. Durch Training und Dressur hatten die Kutschpferde gelernt, sich in Grenzen selbst (griech. *autòs*, s. o.) an einfache Gesetze (griech. *nómos*: „menschliche Ordnung, von Menschen gesetztes Recht“) zu halten. In diesem Sinne hatten sie und damit das Gespann eine gewisse Autonomie erlangt.

Beim Übergang von der Pferdekutsche zum Automobil gingen wichtige Fähigkeiten zur Hindernisvermeidung und gelegentlich wohl auch zu „autonomen Missionen“ verloren. Manches Mal werden die Pferde einen Kutscher sicher nach Hause gebracht haben, auch wenn er nicht mehr voll fahrtauglich war, oder sie überführten zumindest das Fuhrwerk

in einen „sicheren Zustand“, indem sie sich am Gras des Wegesrandes gütlich taten. Das autonome Automobil will dem Fahrzeug seine verloren gegangene Autonomie zurückgeben, ja die historische Form noch weit übertreffen.

Wichtig für das Verständnis des „autonomen Fahrens“ im Projekt wurde eine spezielle Perception des Begriffs Autonomie bei Kant, wie sie Feil formuliert: Autonomie als „Selbstbestimmung im Rahmen eines übergeordneten (Sitten)-Gesetzes“ [2]. Im Fall des autonomen Fahrzeugs gibt der Mensch dieses Sitten-Gesetz vor, indem er das Verhalten des Fahrzeugs programmiert: Immer wieder muss das Fahrzeug im Verkehr Verhaltensentscheidungen treffen – bzw. werden Entscheidungen ausgeführt, die zuvor von Menschen für alle erdenklichen Fälle programmiert wurden.

Es soll nicht verschwiegen werden, dass die Reaktion von Expertinnen und Experten unterschiedlichster Fachdisziplinen von völliger Ablehnung dieser Definition bis hin zu abgewogener Zustimmung reichte und reicht. Unabhängig davon war es aber mit dem Verweis auf den so verstandenen und interpretierten Kantschen Autonomie-Begriff möglich geworden, die unmittelbare Verknüpfung von technischer Entwicklung und ethischen Überlegungen aufzuzeigen.

Die Bedeutung dieser Definition für Techniker zeigt sich nach meiner Erfahrung deutlich im Dialog mit Studierenden: Konfrontiert mit dieser Definition konnten Studierende der Ingenieurwissenschaften in Braunschweig und München bereits in den letzten zehn Jahren erkennen, dass sie bei der Entwicklung autonomer Fahrzeuge nicht nur Technik erforschen und entwickeln sollen, sondern in aller Konsequenz auch „Sittengesetze“ implementieren werden: Wie verhält sich ein autonomes Fahrzeug in einer Dilemma-Situation, wenn bei einem Unfall unvermeidlich der eine oder andere Verkehrsteilnehmer zumindest verletzt wird? Diese Diskussion wird in diesem Buch von Patrick Lin und Chris Gerdes vertieft (s. Kap. 4 und Kap. 5).

Zur Verständigung von Technikern und Juristen wurden in einer von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) geleiteten Arbeitsgruppe unterschiedliche Assistenz- und Automatisierungsgrade definiert [3]. Der höchste definierte Automatisierungsgrad wird dort „vollautomatisiert“ genannt: Das vollautomatisierte Fahrzeug fährt selbst ohne menschliche Überwachung. Bei Degradation der Leistungsfähigkeit des Systems wird das Fahrzeug selbstständig „in den risikominimalen Systemzustand zurückgeführt“. Aus technischer Sicht besteht die besondere Herausforderung darin, dass kein menschlicher Überwacher zur Verfügung steht, der Systemgrenzen oder Systemfehler erkennt und bei Bedarf das Fahrzeug in den sicheren Zustand überführt. Das vollautomatisierte Fahrzeug muss selbstständig seinen eigenen Zustand überwachen, mögliche Systemfehler und Degradationen der Leistungsfähigkeit rechtzeitig erkennen und dann – bei drohendem Leistungsabfall – den Übergang in einen sicheren Zustand einleiten und durchführen. Offensichtlich nimmt der sichere Zustand eine zentrale Rolle in der Definition ein: Worin besteht aber der sichere Zustand, wenn sich ein Fahrzeug vollautomatisiert mit 130 Stundenkilometern über die Autobahn bewegt?

Pointiert folgert Ohl [5], dass die in den letzten Jahrzehnten von Forschungsinstituten, Fahrzeugherstellern und IT-Konzernen gezeigten Prototypen für autonome Fahrzeuge im öffentlichen Straßenverkehr im Sinne der Definitionen der BASt nur teilautomatisiert

unterwegs waren und sind. Sicherheitsfahrer überwachen das automatisierte Fahrzeug; damit bleibt der technische Nachweis für die Serienreife des Sicherheitskonzeptes letztendlich aus. Im Sinne der Definition für vollautomatisiertes Fahren fehlt damit bis heute der Machbarkeitsnachweis für Fahrten auf öffentlichen Straßen, selbst wenn der Sicherheitsfahrer bei mancher Fahrt nicht eingreifen musste.

Bei aller Expertenkritik am Begriff seien autonome Fahrzeuge in diesem Buch durch ihre „Selbstbestimmung im Rahmen eines übergeordneten (Sitten)-Gesetzes“ (Kant, nach [2], s. o.) gekennzeichnet, das der Mensch vorgibt; im Sinne der Definitionen der BAST sind sie vollautomatisierte Fahrzeuge [3].

Aus Platzgründen sei in diesem Buch auf eine vollständige Dokumentation des Standes der Forschung und der Technik und auf eine Schilderung der Forschungshistorie verzichtet. In Bezug auf autonome Straßenfahrzeuge haben Matthaei et al. [4] den aktuellen Stand der Technik zusammengetragen. Fabian Kröger gibt in Kap. 3 einen eindrucksvollen Überblick über autonomes Fahren als Vision oder Science-Fiction in der Geschichte vor allem der bildgebenden Medien.

---

## 1.2 Autonomes Fahren – Motivatoren in der Forschung

In der Vergangenheit und auch heute wird die Forschung an vollautomatisierten Fahrzeugen [3] aus einer Vielzahl von Gründen betrieben. Hier seien nur die meistgenannten erwähnt.

Auch wenn in Deutschland die Zahl der Unfalltoten beinahe jährlich sinkt, so sind doch die weltweit geschätzten Zahlen Anlass genug für eine weitere Erhöhung der Sicherheit des Verkehrssystems. Laut WHO starben 2010 weltweit 1,24 Millionen Menschen durch Verkehrsunfälle [7]. Thomas Winkle beschäftigt sich in Kap. 17 mit der Frage, unter welchen Voraussetzungen sich die unfallvermeidende Wirkung von automatisierten Fahrzeugen bereits vor der Markteinführung eines Systems prognostizieren lässt.

Im Mittelpunkt des jeweiligen Fahrzeugsystems sollte der Assistenzbedarf der Fahrerin/des Fahrers oder der potenziellen Nutzerin/des potenziellen Nutzers stehen. Ist sie oder er mit Tätigkeiten konfrontiert, die ermüden und keinen Fahrspaß generieren (Stop-and-go-Verkehr, lange Autobahnstrecken)? Oder ist sie oder er temporär nicht fahrtauglich, beispielsweise unter dem Einfluss von Medikamenten oder durch Müdigkeit, oder schlicht zu unaufmerksam für aktives Fahren? Besteht Assistenzbedarf, weil die Sinne alters- oder krankheitsbedingt nachlassen, die Muskulatur oder das Skelett erkranken? Dann eröffnen autonome Fahrfähigkeiten des Autos neue Chancen für die individuelle Mobilität.

Vollautomatisiertes Fahren [3] bietet große Potenziale bei der Optimierung des Verkehrsflusses. Bereits das wohl bekannteste europäische Programm zur Fahrzeugautomatisierung des vergangenen Jahrhunderts wies auf dieses Ziel hin: „**P**rogramme for a **E**uropean traffic with **h**ighest **e**fficiency and **u**nprecedented **s**afety“ (1987–1994), kurz „Prometheus“ [6]. Jüngere Projekte zeigen technische Lösungen auf, die speziell der Erhöhung des Verkehrsflusses dienen. In Kap. 15, Kap. 16 und Kap. 19 befassen sich die Autoren mit den



Potenzialen von autonomen Fahrzeugen in Hinblick auf den Verkehrsfluss und neue Nutzungskonzepte für Fahrzeuge.

Besondere Beachtung verdient die Bedeutung autonomer Fahrfähigkeiten für Nutzfahrzeuge. Heike Flämig untersucht, welche Möglichkeiten sich für autonome Fahrzeuge im Bereich des Güterverkehrs ergeben (s. Kap. 18).

Bislang nicht im Fokus der Forschungsgemeinschaft stehen die Potenziale, die sich durch die Einführung autonomer Fahrzeuge für eine weitreichende Umgestaltung des Verkehrssystems, ja der Städte an sich ergeben. Die Autorinnen und Autoren der Teile „Mobilität“ und „Akzeptanz“ dieses Buches zeigen auf, wie vielschichtig die Veränderungen sein können, die durch die Einführung autonomer Fahrzeuge möglich werden. Diese potenziellen Veränderungen können Motivatoren, aber auch Hemmnisse für die Einführung sein.

---

## 1.3 Gliederung des Buches

Im Anschluss an diese Einleitung werden zunächst Use-Cases erläutert, die zum gemeinsamen Verständnis von autonomem Fahren bei den Autorinnen und Autoren beigetragen hatten und dies auch für die Leserschaft leisten sollen (s. o.). Darauf folgen sechs Teile, die jeweils von fachlich kompetenten Herausgeberinnen und Herausgebern betreut wurden. Aus deren Federn stammen auch die kurzen Einführungen, die jedem dieser Teile vorangestellt sind.

Den ersten Teil zum Thema „Mensch und Maschine“ eröffnet Fabian Kröger mit einer Zusammenfassung der öffentlichen, meist medialen Auseinandersetzung mit autonomen Straßenfahrzeugen seit dem Beginn erster Arbeiten zur Fahrzeugautomatisierung vor fast hundert Jahren. Chris Gerdes und Patrick Lin adressieren, wie autonomes Fahren unter ethischen Gesichtspunkten zu bewerten ist und ob sich autonome Fahrzeuge ethisch korrekt verhalten können. Berthold Färber und Ingo Wolf diskutieren Fragen des Miteinanders von Mensch und Maschine.

Im Teil „Mobilität“ wird untersucht, wie sich die Mobilität generell und in einzelnen Aspekten durch die Einführung autonomer Fahrzeuge verändern könnte. Dazu geben Miranda Schreurs und Sibyl Steuwer einen Überblick über die politischen Rahmenbedingungen. Barbara Lenz und Eva Fraedrich diskutieren die Potenziale für neue Mobilitätskonzepte, die sich durch autonomes Fahren ergeben könnten. Sven Beiker stellt unterschiedliche Einführungszenarien für vollautomatisierte Fahrzeuge [3] vor; außerdem diskutiert er einen ganz konkreten Anwendungsfall. Dirk Heinrichs untersucht Konsequenzen und neue Fragestellungen für die Stadtentwicklung, die durch autonomes Fahren entstehen könnten. Hermann Winner und Walther Wachenfeld diskutieren die Auswirkungen, die autonomes Fahren auf das Fahrzeugkonzept an sich haben könnte. Rita Cyganski geht der Frage nach, wie autonome Fahrzeuge die Nachfrage nach Mobilität verändern können und wie sich dies in Modellen zur Verkehrsplanung abbilden ließe.

Im Teil „Verkehr“ prognostizieren Peter Wagner und Bernhard Friedrich, welche verkehrlichen Wirkungen autonome Fahrzeuge haben könnten. Thomas Winkle vertieft die

Diskussion um das Sicherheitspotenzial assistierter, teil- und vollautomatisierter Fahrzeuge [3]. Heike Flämig untersucht die besondere Bedeutung für den Gütertransport. Marco Pavone diskutiert das Potenzial von „Mobility-on-demand“.

Im Teil „Sicherheit“ werden grundlegende Fragen der technischen Zuverlässigkeit in der maschinellen Wahrnehmung (Klaus Dietmayer), der funktionalen Sicherheit (Andreas Reschka, Walther Wachenfeld, Hermann Winner) und der Datenintegrität (Kai Rannenber) erörtert.

Im Teil „Recht und Haftung“ beschäftigen sich Tom Gasser, Stephen Wu und Bryant Walker Smith mit den geltenden Rechtsordnungen und rechtlichen Rahmenbedingungen für autonomes Fahren in Deutschland und den USA; Thomas Winkle empfiehlt die Einbeziehung von Expertenerfahrungen aus Haftungsfällen in den Entwicklungsprozess.

Im Teil „Akzeptanz“ gehen Eva Fraedrich und Barbara Lenz den Fragen zur individuellen und gesellschaftlichen Akzeptanz des automatisierten Fahrens nach. Armin Grunwald vertieft Fragen der gesellschaftlichen Risikoperzeption im Zusammenhang mit autonomem Fahren. Eva Fraedrich und Barbara Lenz untersuchen den Zusammenhang zwischen heutigen Praktiken der Autonutzung und Einstellungen zum autonomen Fahren. David Woischläger diskutiert ökonomische Konsequenzen für die klassische Automobilindustrie und neue Marktteilnehmer.

---

## 1.4 Arbeit im Projekt

Die Arbeitsweise im Projekt „Autonomes Fahren – Villa Ladenburg“ hat das vorliegende Buch beeinflusst. Daher sei sie hier kurz skizziert und transparent gemacht. „Motor“ des Projektes war das Kernteam bestehend aus Chris Gerdes, Barbara Lenz, Hermann Winner und Markus Maurer. Es konnte sich dabei auf die wissenschaftliche Mitarbeit von Eva Fraedrich, Walter Wachenfeld und Thomas Winkle stützen, denen an dieser Stelle herzlich gedankt sei. Im ersten Jahr der zweijährigen Projektlaufzeit – das Projekt dauerte insgesamt von Oktober 2012 bis September 2014 – wurden im Kernteam über 200 Fragen identifiziert, die relevant sind für das autonome Fahren. Diese Fragen waren die Basis für Lastenhefte, die den Autorinnen und Autoren dieses Buches als Leitfaden dienten. Drei Workshops wurden durchgeführt, um ein ähnliches Verständnis vom autonomen Fahren unter den Akteuren im Projekt zu erzeugen und die unterschiedlichen Perspektiven aus den verschiedenen Fachdisziplinen im Projekt bekannt zu machen: Auf einem ersten Workshop im November 2013 in Stuttgart-Möhringen wurde das Konzept des Projektes und das Grundverständnis vom autonomen Fahren – gegeben durch die oben diskutierten Definitionen und die Use-Cases (s. Kap. 2) – vorgestellt und erörtert. Auf zwei weiteren Workshops in Monterey (Februar 2014) und Walting (März 2014) präsentierten die Autorinnen und Autoren ihre Antworten auf die Lastenhefte und stellten sie damit allgemein im Projekt zur Diskussion. Der Disziplin, der Offenheit und der Expertise der Autorinnen und Autoren ist es zu verdanken, dass mit diesem Buch eine umfassende Diskussion über autonome Fahrzeuge vorgelegt werden kann, die gleichermaßen die gesellschaftlichen Potenziale und die Herausforderungen

auf dem Weg zur Serienreife adressiert. In diesem Sinne will dieses Buch Startpunkt für die nachhaltige Erforschung und Entwicklung autonomer Straßenfahrzeuge sein.

Ein besonders herzlicher Dank geht an alle Autorinnen und Autoren, die sich in diesem Buchprojekt zielorientiert, diszipliniert und immer offen für den interdisziplinären Dialog engagiert haben.

In der Schlussphase der Entstehung dieses Buches wurden die Autorinnen und Autoren von den Herausgeberinnen und Herausgebern der einzelnen Teile betreut, die dabei sehr engagiert die Konvergenz der Beiträge in den einzelnen Teilen unterstützten. Die Herausgabe der Teile gehörte zu den Aufgaben der Mitglieder des Kernteams. Ein besonderer Dank geht an Tom Gasser und Bernhard Friedrich, die jeweils die Herausgabe eines Teiles übernommen haben, obwohl sie nicht Mitglieder des Kernteams waren. Die entsprechende Fachkompetenz war im Kernteam nicht vorhanden.

Schon vor seinem Abschluss hat das Projekt die öffentliche wie auch die fachliche Diskussion zum autonomen Fahren in Deutschland und den USA erheblich beeinflusst. Als besonders positiv erwies sich, dass viele Akteure im Projekt seit Dezember 2013 auch am runden Tisch zum „automatisierten Fahren“ auf Initiative des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) und seinen Arbeitsgruppen mitarbeiteten. Ergebnisse aus dem Projekt flossen und fließen daher in die Berichte des runden Tisches ein. Das Interesse der Fachwelt und der Öffentlichkeit wurde deutlich in der Resonanz auf die zahlreichen Vorträge, Pressegespräche und Veröffentlichungen, die im Projektkontext durchgeführt wurden. In den Projektzeitraum fallen auch erhebliche Korrekturen in der Kommunikation führender Fahrzeughersteller und Technologieunternehmen in Bezug auf das autonome Fahren. Es ist nicht auszuschließen, dass dieses Projekt hier schon erste sehr relevante Spuren hinterlassen hat.

Auch wenn es im Projekt selbst um autonomes Fahren im Sinne einer klaren, wissenschaftlich abgegrenzten Definition ging, wird ein Teil seiner Ergebnisse sicher unmittelbare Praxisrelevanz haben für hochautomatisierte Fahrzeuge und auch für Fahrerassistenzsysteme, die schon bald in Serienfahrzeugen auf die Straßen kommen werden.

Dieses Buch ist nur möglich geworden dank der Förderung durch die Daimler und Benz Stiftung, für die wir herzlich danken. „Wir“ sind in diesem Kontext alle Autorinnen, Autoren, Herausgeberinnen und Herausgeber dieses Buches. Wir danken auch für die gute Zusammenarbeit mit dem Springer-Verlag und die hochwertige Ausstattung der Druckausgabe. Dank der Förderung durch die Stiftung ist dieses Buch kostenlos elektronisch verfügbar. Ein besonderer Dank geht an verschiedene Mitarbeiter der Daimler AG für interessante Diskussionen, vor allem aber für das Verständnis, dass sich die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler in diesem Projekt – unabhängig von Unternehmensinteressen – von wissenschaftlich motivierten Fragestellungen leiten ließen.

Mein ganz persönlicher Dank geht an Barbara, Chris und Hermann für die Bereitschaft, im Kernteam mitzuwirken, für die intensive Zusammenarbeit, für die Offenheit in den Diskussionen, für das ständige Streben, die eigene Erfahrung einzubringen, die eigenen Konzeptionen weiterzuentwickeln und das stete Ringen, gemeinsam zur nachhaltigen Erforschung und Entwicklung von autonomen Fahrzeugen beizutragen.

## Literatur

1. Duden Deutsches Universalwörterbuch A–Z, Mannheim. Duden-Verlag (1989)
2. Feil, E.: Antithetik neuzeitlicher Vernunft – ‚Autonomie – Heteronomie‘ und ‚rational – irrational‘. 1. Auflage Göttingen Vandenhoeck & Ruprecht (1987)
3. Gasser, T., Arzt, C., Ayoubi, M., Bartels, A., Bürkle, L., Eier, J., Flemisch, F., Häcker, D., Hesse, T., Huber, W., Lotz, C., Maurer, M., Ruth-Schumacher, S., Schwarz, J., Vogt, W.: Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung – Gemeinsamer Schlussbericht der Projektgruppe. In: Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch-Gladbach (2012)
4. Matthaei, R., Reschka, A., Rieken, J., Dierkes, F., Ulbrich, S., Winkle, T., Maurer, M.: Autonomes Fahren in: Winner, H., Hakuli, S., Lotz, F., Singer, C.: Handbuch Fahrerassistenzsysteme, Vieweg-Teubner-Verlag, 3. Auflage (2015)
5. Ohl, S.: Fusion von Umfeld wahrnehmenden Sensoren in städtischer Umgebung, Dissertation, TU Braunschweig (2014)
6. Nagel, H.-H.: EUREKA-Projekt PROMETHEUS und PRO-ART (1986–1994) in: Reuse, B., Vollmar, R.: Informatikforschung in Deutschland, Springer, 2008
7. WHO 2013: [http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2013/road\\_safety\\_20130314/en/](http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2013/road_safety_20130314/en/); abgerufen am 8.11.2014

Walther Wachenfeld, Hermann Winner, Chris Gerdes, Barbara Lenz,  
Markus Maurer, Sven A. Beiker, Eva Fraedrich, Thomas Winkle

---

W. Wachenfeld (✉)

Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Fahrzeugtechnik – FZD, Deutschland  
wachenfeld@fzd.tu-darmstadt.de

H. Winner

Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Fahrzeugtechnik – FZD, Deutschland  
winner@fzd.tu-darmstadt.de

J.C. Gerdes

Stanford University, Dept. of Mechanical Engineering Center for Automotive Research at Stanford,  
USA  
gerdes@stanford.edu/gerdes@cdr.stanford.edu

B. Lenz

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V, Institut für Verkehrsforschung, Deutschland  
Barbara.Lenz@dlr.de

M. Maurer

TU Braunschweig, Institut für Regelungstechnik, Deutschland  
maurer@ifr.ing.tu-bs.de

S. A. Beiker

formerly Stanford University, Center for Automotive Research at Stanford  
sven@svenbeiker.com

E. Fraedrich

Humboldt-Universität zu Berlin, Geographisches Institut, Deutschland  
eva.fraedrich@geo.hu-berlin.de

T. Winkle

Technische Universität München – TUM, Maschinenwesen, Lehrstuhl für Ergonomie, Deutschland  
winkle@carforensic.com

## Inhaltsverzeichnis

<b>2.1 Einleitung</b> .....	10
<b>2.2 Getroffene Annahmen</b> .....	11
<b>2.3 Beschreibung der Use-Cases</b> .....	12
2.3.1 Autobahnautomat mit Verfügbarkeitsfahrer – Autobahnpiilot .....	12
2.3.2 Autonomes Valet-Parken .....	14
2.3.3 Vollautomat mit Verfügbarkeitsfahrer .....	17
2.3.4 Vehicle-on-Demand .....	19
<b>2.4 Ausgewählte Merkmale zur Beschreibung der Use-Cases</b> .....	21
2.4.1 Merkmal A: Art des Beförderten .....	22
2.4.2 Merkmal B: Maximal zulässige Gesamtmasse .....	22
2.4.3 Merkmal C: Einsatzhöchstgeschwindigkeit .....	23
2.4.4 Merkmal D: Szenerie .....	24
2.4.5 Merkmal E: Dynamische Elemente .....	26
2.4.6 Merkmal F: Informationsfluss zwischen Fahrroboter und anderen Instanzen .....	27
2.4.7 Merkmal G: Verfügbarkeitskonzept .....	29
2.4.8 Merkmal H: Erweiterungskonzept .....	30
2.4.9 Merkmal I: Eingriffsmöglichkeiten .....	32
<b>2.5 Grundlegende Definitionen</b> .....	34
<b>Literatur</b> .....	37

---

## 2.1 Einleitung

Der Begriff des autonomen Fahrens wurde mithilfe der technischen Definition des Automatisierungsgrads „vollautomatisiert“ nach BAST [1] und zusätzlich durch das Verständnis der „Selbstbestimmung im Rahmen eines übergeordneten (Sitten)-Gesetzes“ [2] in Kap. 1 beschrieben. Trotzdem kann innerhalb dieser Rahmendefinition eine Vielfalt an Einsatzmöglichkeiten und Ausprägungen des autonomen Fahrens gefunden werden. Um diese Vielfalt der Möglichkeiten zu beherrschen, werden für die Varianten Stellvertreter gesucht. Einerseits bilden die Stellvertreter die Variationsbreite der Unterscheidungsmerkmale, die im Folgenden (Abschn. 2.4) definiert werden, ab. Andererseits stehen sie für typische Einsatzszenarien des autonomen Fahrens. Sie werden im Weiteren als Use-Cases des autonomen Fahrens bezeichnet. Um bei den Lesern und allen an dieser Diskussion Beteiligten ein gemeinsames Verständnis des autonomen Fahrens zu schaffen, werden ausgewählte Use-Cases benannt und zusätzlich durch Unterscheidungsmerkmale beschrieben. Ferner werden die vier abgeleiteten Use-Cases als Referenzbeispiele für weitere Betrachtungen innerhalb dieses Buches dienen, immer in dem Bewusstsein, dass eine Vielzahl weiterer Use-Cases existiert. Andere Use-Cases sollen damit sowohl für dieses Buch als auch für die Zukunft des autonomen Fahrens nicht ausgeschlossen werden.

Die in diesem Kapitel getroffenen Definitionen und Annahmen können zusätzlich für die unterschiedlichen Arbeitsbereiche durch detaillierte Beschreibungen erweitert werden, da jene für die verschiedenen Arbeitsbereiche in unterschiedlicher Weise relevant sind. Das Besitzverhältnis ist beispielsweise für eine technische Betrachtung weniger relevant als für eine Betrachtung der Marktauswirkungen. Deshalb sind Definitionen und Annahmen für den Einsatz in den unterschiedlichen Arbeitsbereichen kritisch zu prüfen.

Die Herleitung und Beschreibung der Use-Cases sind in drei Abschnitte unterteilt: Zunächst werden in Abschn. 2.2 Einschränkungen und Annahmen beschrieben, die übergeordnet für alle Use-Cases gelten. Anschließend folgt in Abschn. 2.3 die Beschreibung der vier ausgewählten Use-Cases hinsichtlich ihrer Merkmalsausprägungen. Zur weiteren Vertiefung für interessierte Leser werden in Abschn. 2.4 die eingesetzten Merkmale zur Beschreibung der Use-Cases motiviert und erläutert. Zur Klärung von eventuellen Verständnisproblemen aufgrund unbekannter Begriffsdefinitionen werden die den Use-Cases zugrunde liegenden Begrifflichkeiten in Abschn. 2.5 erklärt. Dieser Aufbau wurde gewählt, um den Einstieg in die Use-Case-Beschreibung zu erleichtern; Unklarheiten in den ersten Abschnitten klären sich meist durch den Blick in Abschn. 2.5 (Grundlegende Definitionen) und Abschn. 2.4 (Ausgewählte Merkmale zur Beschreibung der Use-Cases).

---

## 2.2 Getroffene Annahmen

Folgende Annahmen werden für alle vorgestellten Use-Cases gleichermaßen getroffen:

**Mischbetrieb:** Die Use-Cases werden zum Betrachtungszeitraum in einem Mischbetrieb aus Verkehrsmitteln mit unterschiedlichen Automatisierungsgraden eingesetzt. Der Straßenverkehr besteht aus Fahrzeugen mit allen Automatisierungsgraden von „driver-only“ über „assistiert“ bis „vollautomatisiert“ (nach BASt [1]). Durch die stufenweise Einführung der Automatisierung ist eine menschliche Fahrzeugführung gleichzeitig zur Fahrzeugführung durch Fahrroboter wahrscheinlich.

**Technisches Ausfallrisiko:** Hardware-Ausfälle und Software-Fehler können auch bei autonom fahrenden Fahrzeugen auftreten. Allerdings wird davon ausgegangen, dass das nach aktuellem Stand der Technik (z. B. ISO 26262) entwickelte autonome Fahrzeug hinsichtlich der genannten Ausfälle mindestens so zuverlässig und sicher ist, wie es heutige konventionelle Fahrzeuge sind.

**Detaillierungsgrad:** Die Beschreibung der Use-Cases ist keine detaillierte Spezifikation. Statt einer detaillierten Beschreibung von Wetterbedingungen, Lichtverhältnissen, Fahrbahnbeschaffenheiten usw. wird vereinfachend angenommen, dass die Qualität sowie die Erfolgsquote, mit der ein Fahrroboter die Fahraufgabe ausführt, der menschlichen Qualität und Erfolgsquote ähnlich sind. Beispielsweise führt starker Regen erst dann zu einem Überführen in den sicheren Zustand und der Unterbrechung der Transportaufgabe, wenn auch der Fahrer die Fahrt unterbrechen würde. In diesem Kapitel bleibt unbeantwortet, ob diese Annahme aus Sicht der Nutzer, der Gesellschaft usw. ausreichend ist. Außerdem bleibt in diesem Kapitel offen, wie diese Qualität und Erfolgsquote quantifiziert und nachgewiesen werden könnte.

**Gesetzeskonformität:** Für alle Use-Cases wird angenommen, dass die autonome Fahrt konform zum Regelwerk des Rechtsraums (Nationalstaat, bundesstaatliche Ebene in den USA) durchgeführt wird, in dem die aktuelle Fahrt stattfindet. Aus dieser Annahme folgt direkt die Frage nach dem Handeln in Dilemma-Situationen: Ist es dem Fahrroboter erlaubt bzw. besitzt er die Möglichkeit, geltende Regeln zu missachten, um einen größeren Schaden zu vermeiden? Für die Use-Cases wird angenommen, dass es einen rechtsgültigen Satz von Regeln bzw. Metaregeln gibt, die der Fahrroboter beachtet. Dafür existiert eine Freigabe von jenem Staat zur Ausführung des autonomen Fahrens, wobei in diesem Kapitel offen gelassen wird, wie diese Freigabe zu erwerben ist und wie diese Regeln lauten.

---

## 2.3 Beschreibung der Use-Cases

Wie bereits erwähnt, stellen Use-Cases typische Einsatzszenarien autonomen Fahrens dar; sie sind Stellvertreter einer Variationsvielfalt von möglichen Ausprägungen autonomen Fahrens. Im Folgenden wurde die Anzahl auf vier Use-Cases reduziert, wobei die Existenz weiterer Stellvertreter hierdurch nicht ausgeschlossen wird. Diese vier Use-Cases lauten:

- Autobahnautomat mit Verfügbarkeitsfahrer – Autobahnпилот
- Autonomes Valet-Parken
- Vollautomat mit Verfügbarkeitsfahrer
- Vehicle-on-Demand

Bei der automatisierten Fahrt jeder dieser vier Use-Cases handelt es sich um die Automatisierung *Level 4 – vollautomatisiert* nach BSt [1]. Besonders die Aufteilung der Fahraufgabe zwischen Mensch und Fahrroboter, in der sich die vier Varianten voneinander unterscheiden, hat zur Auswahl dieser Use-Cases beigetragen. Die ersten zwei Use-Cases sind als Einstiegsvarianten des autonomen Fahrens denkbar, wohingegen die zwei letzten Use-Cases perspektivische Varianten darstellen.

### 2.3.1 Autobahnautomat mit Verfügbarkeitsfahrer – Autobahnпилот

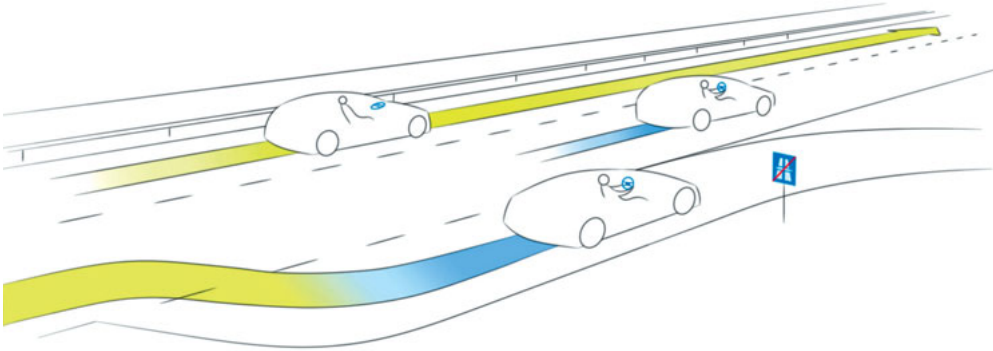
#### 2.3.1.1 Nutzen

Der Fahrroboter übernimmt ausschließlich auf Autobahnen oder autobahnähnlichen Schnellstraßen die Fahraufgabe (s. Abb. 2.1). Der Fahrer wird während der autonomen Fahrt zum Passagier und bekommt die Möglichkeit, seine Hände bzw. Füße vom Lenkrad bzw. von der Pedalerie zu nehmen und einer anderen Tätigkeit nachzugehen.

#### 2.3.1.2 Beschreibung

Ab Autobahnbeginn bzw. der Auffahrt wird dem Fahrer die Möglichkeit geboten, den Fahrroboter zu aktivieren, wobei dies sinnvollerweise in Verbindung mit der Übergabe einer Zieladresse einhergeht. Der Fahrroboter übernimmt die Navigation, Bahnführung und





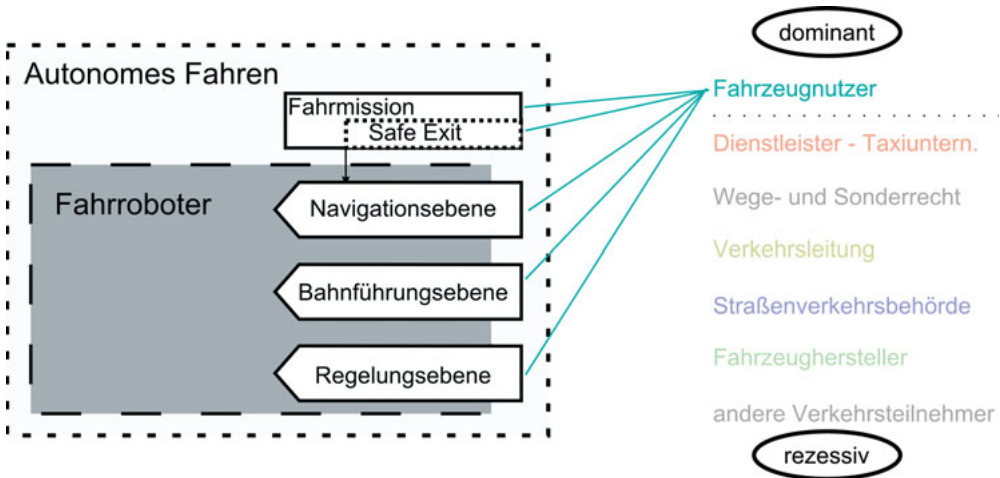
**Abb. 2.1** Autobahnautomat mit Verfügbarkeitsfahrer – Autobahnпилот

Regelung so lange, bis eine Autobahnausfahrt oder ein Autobahnende erreicht bzw. bis er vom Fahrer absichtlich entbunden wird. Die Übergabe an den Fahrer wird vom Fahrer sicher koordiniert. Erfüllt der Fahrer nicht die Anforderungen an die sichere Übergabe – z. B. weil er schläft oder ein fehlendes Situationsbewusstsein zeigt – überführt der Fahrer das Fahrzeug in den risikominimalen Zustand auf dem Seitenstreifen oder kurz außerhalb der Autobahn. Während der autonomen Fahrt ist kein Situationsbewusstsein vom Insassen gefordert, es gilt die Definition nach BASt [1] für die vollautomatisierte Fahrt. Besonders die Einschränkungen der Szenerie (z. B. durch das Fehlen von Lichtsignalanlagen) sowie der anzunehmenden dynamischen Objekte (z. B. im Normalfall keine Fußgänger) führen zu einer Vereinfachung, die aus dem Use-Case ein Einstiegsszenario machen könnten, auch wenn die hohe Einsatzgeschwindigkeit das Erreichen eines risikominimalen Zustands erheblich erschwert.

### 2.3.1.3 Merkmalsausprägungen

**Tab. 2.1** Ausprägungen des Autobahnпилот

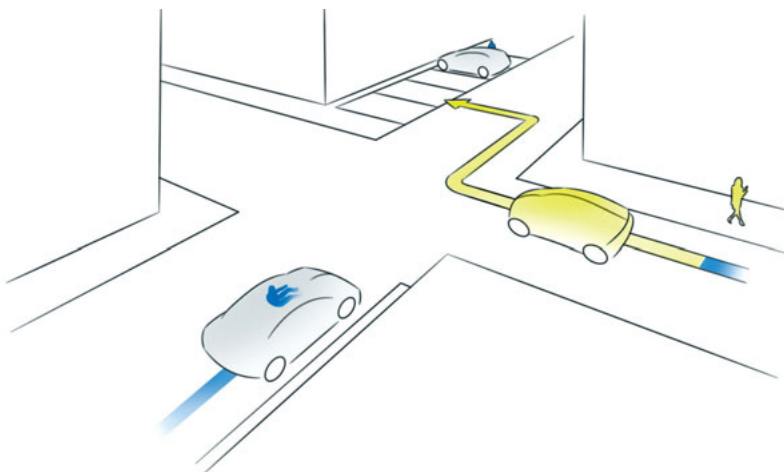
Merkmal		Ausprägung	
A	Art des Beförderten	3.	Person/-en mit abgestimmten Zielen
B	maximal zulässige Gesamtmasse	1-3.	500 kg bis 8 t
C	Einsatzhöchstgeschwindigkeit	4.	bis 120 km/h
D	Szenerie	8. a.	Autobahn      ohne Freigabe erlaubt
E	dynamische Elemente	2.	nur Kraftfahrzeuge
F	Informationsfluss zwischen Fahrerroboter und anderen Instanzen	1-4.	optimierte Navigation, optimierte Bahnführung, optimierte Regelung und Bereitstellen von Umweltinformationen
G	Verfügbarkeitskonzept	2.	Verfügbarkeitsfahrer
H	Erweiterungskonzept	2.	Fahrer
I	Eingriffsmöglichkeiten		siehe Abb. 2.2



**Abb. 2.2** Eingriffsmöglichkeiten beim Autobahnpiilot

Abbildung 2.2 illustriert die Eingriffsmöglichkeiten der Instanzen auf die Ebenen der Fahraufgabe für den Use-Case Autobahnpiilot. Der Fahrzeugnutzer bildet hierbei die einzige Instanz, die die Möglichkeit und Befugnis besitzt, einzugreifen. Dabei sei noch einmal hervorgehoben, dass die Übergabe durch den Fahrroboter sicher gestaltet wird. Eventuelle Dienstreiter, Polizei und Krankenwagen mit Wegerecht, eine Verkehrsleitung usw. besitzen keine Möglichkeit, in die Fahrzeugführung einzugreifen. Eine ausführliche Beschreibung der verwendeten Merkmale erfolgt in Abschn. 2.4.

### 2.3.2 Autonomes Valet-Parken



**Abb. 2.3** Autonomes Valet-Parken

### 2.3.2.1 Nutzen

Der Fahrroboter stellt das Fahrzeug nach Verlassen der Passagiere und dem Ausladen von Transportgut in einer nahen oder auch entfernten Parkposition ab (s. Abb. 2.3). Der Fahrroboter fährt das Fahrzeug wieder von der Parkposition an eine Wunschadresse und besitzt die Möglichkeit und Berechtigung umzuparken. Der Fahrer spart die Zeit für die Parkplatzsuche, das Abstellen sowie die Fußwege eines entfernteren Parkplatzes. Außerdem wird der Zugang zum Fahrzeug erleichtert (räumlich wie zeitlich). Zusätzlich wird der Parkraum besser genutzt und die Parkplatzsuche effizienter gestaltet.

### 2.3.2.2 Beschreibung

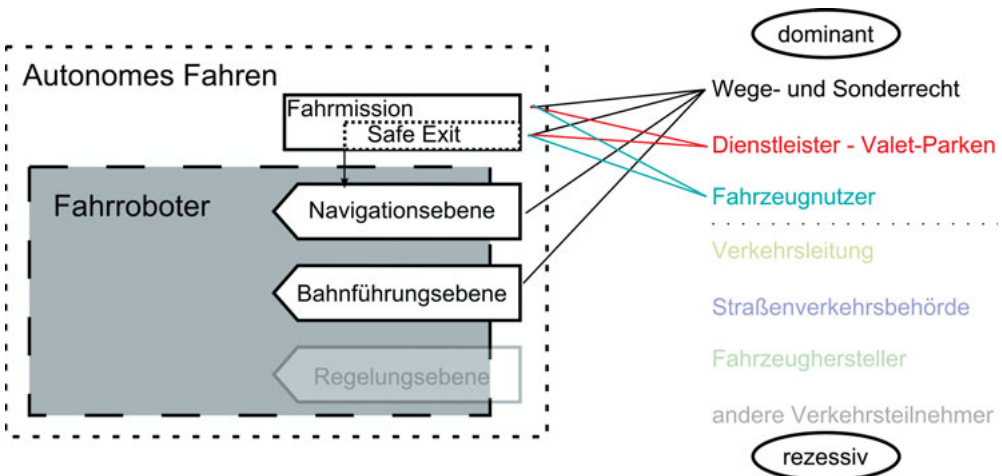
Erreicht ein Fahrer sein Fahrtziel (z. B. Arbeitsplatz, Sportverein, Wohnung), stoppt dieser das Fahrzeug, steigt aus und gibt dem Fahrroboter den Befehl, das Fahrzeug abzustellen. Somit kann der Fahrroboter das Fahrzeug nun zu einem privaten Parkplatz, einem öffentlichen Abstellplatz oder einem Parkplatz des Dienstleisters wie z.B. einer Carsharing-Flotte bringen. Wichtig hierbei ist, dass dem Fahrroboter ein Parkareal zugewiesen wird, da der Parksuchverkehr durch den Fahrroboter für diesen Use-Case ausgeschlossen wird. Somit gibt es immer ein definiertes Ziel für den Fahrroboter. Ist das Fahrzeug abgestellt, ist das Umparken aufgrund der Anweisung einer autorisierten Parkplatzverwaltung möglich. Wird das Fahrzeug wieder benötigt, teilt ein autorisierter Nutzer des Fahrzeugs dem Fahrroboter eine Abholadresse mit. Der Fahrroboter fährt das Fahrzeug an diese Zieladresse und hält an, sodass der Fahrer einsteigen und die Fahraufgabe übernehmen kann.

Aufgrund der geringen Geschwindigkeit und der begrenzt befahrbaren Szenerie ist der Einsatzbereich des autonomen Valet-Parkens auf eine gewisse Umgebung um den Ort, an dem der Fahrer das Fahrzeug verlassen hat oder er seine Abholung wünscht, begrenzt. Auf der einen Seite reduzieren diese Randbedingungen die Anforderungen an die (Fahr-)Fähigkeiten des Fahrroboters erheblich, denn mit der geringen Geschwindigkeit ergibt sich eine geringere kinetische Energie sowie ein kürzerer Anhalteweg. Auf der anderen Seite könnten diese Randbedingungen dazu führen, dass das Fahrzeug als Verkehrsbehinderung und daher als lediglich begrenzt nützlich angesehen wird. Dieser Use-Case wird als Einstiegszenario betrachtet.

### 2.3.2.3 Merkmalsausprägung

**Tab. 2.2** Ausprägungen des autonomen Valet-Parkens

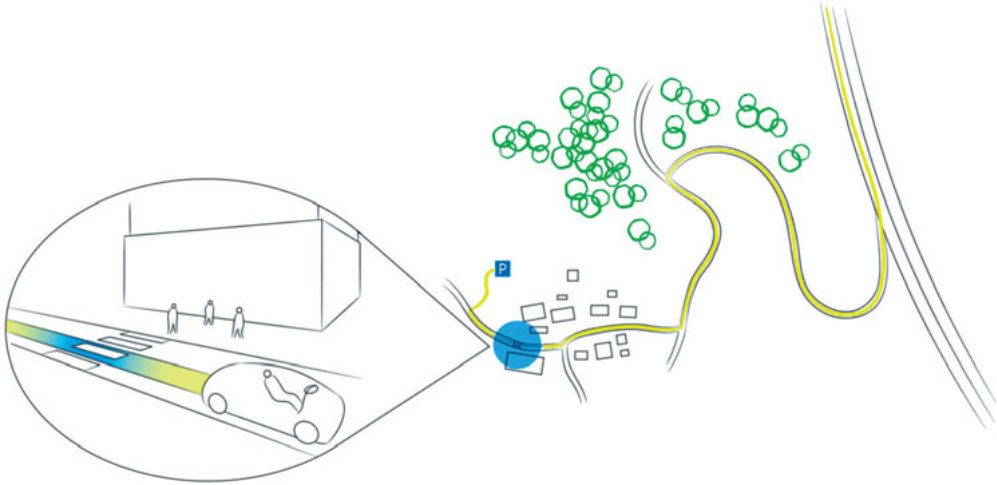
Merkmal		Ausprägung	
A	Art des Beförderten	1.	kein Fördergut und keine Person
B	maximal zulässige Gesamtmasse	1-3.	500 kg bis 8 t
C	Einsatzhöchstgeschwindigkeit	2.	bis 30 km/h
D	Szenerie	3. a. 4. a. 5. a.	Parkplatz bzw. Parkhaus, Erschließungsstraße, angebaute Hauptverkehrsstraße ohne Freigabe erlaubt
E	dynamische Elemente	1.	ohne Ausschluss
F	Informationsfluss zwischen Fahreroboter und anderen Instanzen	1. & 3. & 6.	optimierte Navigation optimierte Regelung Fahrroboterüberwachung
G	Verfügbarkeitskonzept	1.	keine Verfügbarkeitsergänzung
H	Erweiterungskonzept	2.	Fahrer
I	Eingriffsmöglichkeiten		siehe Abb. 2.4



**Abb. 2.4** Eingriffsmöglichkeiten beim autonomen Valet-Parken

Die Instanzen, die in die Fahraufgabe eingreifen können, sind in Abb. 2.4 auf der rechten Seite nach Rangordnung von oben (dominant) nach unten (rezessiv) aufgeführt. Der Fahrzeugnutzer besitzt die Möglichkeit, als externe Größe die Fahrmission zu ändern und dem Fahreroboter einen sogenannten Safe-Exit zu befehlen. Der Dienstleister überstimmt den Fahrzeugnutzer und kann ebenfalls auf die Fahrmission und den Safe-Exit einwirken. Beide Instanzen werden von den Instanzen mit Wege- und Sonderrecht (z. B. Polizei, Krankenwagen) überstimmt. Diese können auf Bahnführungsebene das Fahrzeug abbremsen, Navigation und Fahrmission ändern und einen Safe-Exit befehlen.

### 2.3.3 Vollautomat mit Verfügbarkeitsfahrer



**Abb. 2.5** Vollautomat mit Verfügbarkeitsfahrer

#### 2.3.3.1 Nutzen

Der Fahrer besitzt die Möglichkeit, in den freigegebenen Bereichen die Fahraufgabe an den Fahrroboter zu übergeben. Der Fahrer wird während der autonomen Fahrt zum Passagier und hat die Möglichkeit, seine Hände bzw. Füße vom Lenkrad bzw. von der Pedalerie zu nehmen sowie einer anderen Tätigkeit nachzugehen.

#### 2.3.3.2 Beschreibung

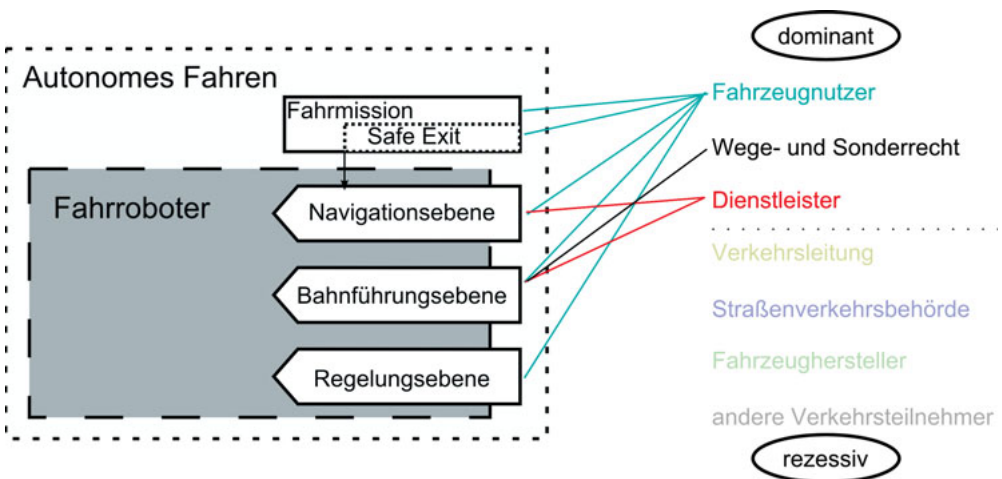
Die Fahraufgabe kann vom Fahrer an den Fahrroboter übergeben werden, wenn die Szenerie, in der er sich befindet, für einen autonomen Fahrbetrieb freigegeben ist. Nahezu der gesamte Verkehrsbereich im zulassenden Land ist für das Fahrzeug freigegeben, jedoch steht diese Freigabe unter dem Vorbehalt einer Eingrenzung. Wenn beispielsweise die Straßenführung geändert oder ein neues Parkhaus eröffnet wird, so könnten diese Bereiche bis zur Freigabe kurzzeitig nicht autonom befahrbar sein. Auch erscheint es in diesem Szenario sinnvoll, dass Streckenabschnitte permanent oder temporär von der Freigabe ausgenommen sind, z. B. Strecken mit einer hohen Fußgängerüberquerfrequenz. Auch hier muss die Übergabe zwischen Fahrer und Fahrroboter in sicherer Weise geschehen.

Dieser Use-Case dürfte den heutigen Vorstellungen des autonomen Fahrens am nächsten kommen, da er stark mit der heutigen Pkw-Nutzung übereinstimmt. Zwar ist die Fahraufgabe nahezu vollständig an den Fahrroboter delegiert, jedoch begleitet der bisherige Hauptnutzer und Fahrzeugführer diese Fahrt weiterhin.

### 2.3.3.3 Merkmalsausprägung

**Tab. 2.3** Ausprägungen des Vollautomaten mit Verfügbarkeitsfahrer

Merkmal		Ausprägung	
A	Art des Beförderten	3.	Person/-en mit abgestimmten Zielen
B	maximal zulässige Gesamtmasse	1-2.	500 kg bis 2 t
C	Einsatzhöchstgeschwindigkeit	5.	bis 240 km/h
D	Szenerie	2. b.- 8. b.	Wirtschaftsweg, Parkplatz bzw. Parkhaus, Erschließungsstraße, angebaute Hauptverkehrsstraße, anbaufreie Hauptverkehrsstraße, Landstraße, Autobahn mit Freigabe erlaubt
E	dynamische Elemente	1.	ohne Ausschluss
F	Informationsfluss zwischen Fahreroboter und anderen Instanzen	1-6.	optimierte Navigation, optimierte Bahnführung, optimierte Regelung, Bereitstellen von Umweltinformationen, Aktualisierung der Fahreroboterfähigkeit, Fahreroboterüberwachung
G	Verfügbarkeitskonzept	2.	Verfügbarkeitsfahrer
H	Erweiterungskonzept	2.	Fahrer
I	Eingriffsmöglichkeiten		siehe Abb. 2.6

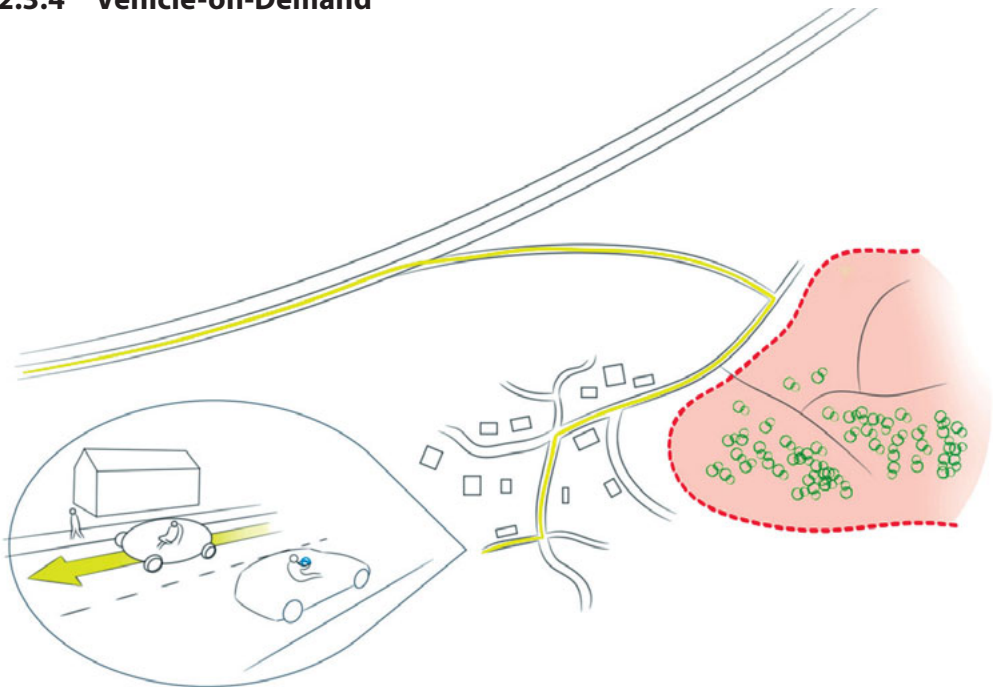


**Abb. 2.6** Eingriffsmöglichkeiten beim Vollautomaten mit Verfügbarkeitsfahrer

In Abb. 2.6 wird dargestellt, welche Instanz (rechts) auf welche Ebene der Fahraufgabe (links) eingreifen kann. Der Fahrzeugnutzer kann, wenn gewünscht, nach sicherer Übergabe durch den Fahreroboter das Fahrzeug wie ein klassisches Driver-Only-Automobil

fahren. Des Weiteren existieren Schnittstellen für die Bahnführungsebene, Navigationsebene und die Fahrmission, sodass der Fahrer auch auf diesen Ebenen Eingriffsmöglichkeiten besitzt. Der Fahrzeugnutzer dominiert die Instanzen mit Wege- und Sonderrecht. Polizei und Krankenwagen, die die Berechtigung besitzen, auf Bahnführungsebene einzugreifen, können somit vom Fahrzeugnutzer überstimmt werden. Entsprechendes gilt für einen Dienstleister: Der Dienstleister könnte auf Navigation und Bahnführung eingreifen, solange er nicht überstimmt wird. Für welche Dienste der Dienstleister diesen Zugriff benötigt, bleibt in diesem Kapitel unbeantwortet. Jedoch sind Konzepte denkbar, bei denen ein Dienstleister für Werbezwecke die Navigation übernimmt und dafür einen Teil der Kraftstoffkosten bzw. der Reisekosten trägt.

### 2.3.4 Vehicle-on-Demand



**Abb. 2.7** Vehicle-on-Demand

#### 2.3.4.1 Nutzen

Der Fahrroboter bewegt das Fahrzeug in allen Szenarien mit Insassen, mit Fördergut oder aber auch komplett ohne Ladeinhalt/Insassen autonom (s. Abb. 2.7). Passagiere nutzen die Fahrzeit komplett frei und für andere Dinge als die Bewältigung der Fahraufgabe. Der Innenraum ist hierbei völlig frei gestaltet. Transportgut kann ohne Pause nahezu 24 Stunden am Tag mithilfe des Fahrroboters transportiert werden, sofern dies durch die Fahrenergieversorgung nicht eingeschränkt wird.

### 2.3.4.2 Beschreibung

Der Fahrroboter bekommt von Insassen bzw. externen Größen (Nutzer, Dienstleister usw.) Fahrtziele mitgeteilt, zu denen er das Fahrzeug autonom befördert. Für den Menschen existiert keine Möglichkeit, die Fahraufgabe zu übernehmen. Er besitzt lediglich die Möglichkeit, das Fahrtziel zu bestimmen oder den Safe-Exit zu aktivieren. Verschiedene Geschäftsmodelle sind mit diesem Fahrroboter denkbar: Eine Mischung aus Taxi-Service und Carsharing, autonome Transportfahrzeuge oder sogar Nutzungsmodelle, die über die alleinige Transportaufgabe hinausgehen. Ein Beispiel hierfür ist ein Fahrzeug für soziale Netzwerke, das direkt Informationen aus dem Netzwerk nutzt, um Routen zu planen und Personen zusammenzubringen, oder das weitere Dienstleistungen anbietet, an die heute noch nicht gedacht wird.

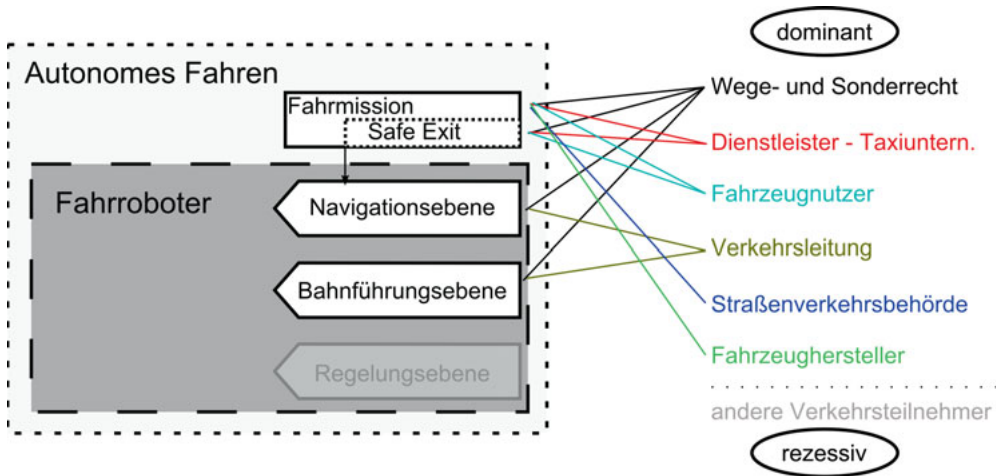
### 2.3.4.3 Merkmalsausprägung

**Tab. 2.4** Ausprägungen des Vehicle-on-Demand

Merkmal		Ausprägung	
A	Art des Beförderten	1-4.	kein Fördergut und keine Person, für Transport aufgegebenes Fördergut, Person/-en mit abgestimmten Zielen, Personen mit nicht abgestimmten Zielen
B	maximal zulässige Gesamtmasse	1-3.	von 500 kg bis 8 t
C	Einsatzhöchstgeschwindigkeit	4.	bis 120 km/h
D	Szenerie	2. a.- 8. a.	Wirtschaftsweg, Parkplatz bzw. Parkhaus, Erschließungsstraße, angebaute Hauptverkehrsstraße, anbaufreie Hauptverkehrsstraße, Landstraße, Autobahn
			ohne Freigabe erlaubt
E	dynamische Elemente	1.	ohne Ausschluss
F	Informationsfluss zwischen Fahrroboter und anderen Instanzen	1-8.	optimierte Navigation, optimierte Bahnführung, optimierte Regelung, Bereitstellen von Umweltinformationen, Fahrroboterüberwachung, Insassenüberwachung, Insassen Notruf
G	Verfügbarkeitskonzept	3.	teleoperiertes Fahren
H	Erweiterungskonzept	1.	keine Erweiterung
I	Eingriffsmöglichkeiten		siehe Abb. 2.8

Die Eingriffsmöglichkeiten auf den Use-Case Vehicle-on-Demand sind besonders aufgrund der weitreichenden (Fahr-)Fähigkeiten des Fahrroboters umfangreich: Die Regelungsebene wird dauerhaft durch den Fahrroboter ausgeführt. Die zwei Instanzen Verkehrsleitung sowie Wege- und Sonderrecht (Instanz mit größter Dominanz) können auf Navigations- und Bahnführungsebene eingreifen. Fahrzeugnutzer und Dienstleister besitzen





**Abb. 2.8** Eingriffsmöglichkeiten beim Vehicle-on-Demand

Zugriff auf den Safe-Exit, sodass ein Insasse das Fahrzeug sicher und schnellstmöglich verlassen kann. Besonders hervorzuheben ist hier, dass der Fahrzeugnutzer vom Dienstleister und der Instanz mit Wege- und Sonderrecht überstimmt werden kann. Überstimmt eine der Instanzen den Nutzer, kann dieser auch den Safe-Exit nicht mehr bedienen und ist gezwungen, weiter im Fahrzeug zu bleiben. Diese Konstellation entspricht aktuellen Taxi-konzepten. Der Taxifahrer kann dem Wunsch eines Fahrgastes entsprechend und so schnell wie möglich anhalten. Prinzipiell hat er jedoch auch die Möglichkeit, diesen Wunsch zu missachten und das Fahrzeug nach eigenem Wunsch zu führen.

## 2.4 Ausgewählte Merkmale zur Beschreibung der Use-Cases

In diesem Abschnitt werden Merkmale und deren mögliche Ausprägungen vorgestellt, mit denen die ausgewählten Use-Cases klassifiziert werden können. Neben den im Folgenden beschriebenen technisch orientierten Merkmalen können noch viele weitere Unterscheidungsmerkmale festgelegt werden, z. B. hinsichtlich Geschäftsmodell oder Marktplatzierung. Dieses soll auch aufgrund des bisher geringen Kenntnisstands über die konkreten Produkte zunächst hintangestellt werden.

Die Merkmale, in der alphabetischen Ordnung A bis I, wurden aus dem Drei-Ebenen-Modell der Fahraufgabe nach Donges [3] abgeleitet und für die Beschreibung ausgewählt. Hierbei wird die Fahraufgabe in die Ebenen Navigation, Bahnführung und Stabilisierung aufgeteilt.

## 2.4.1 Merkmal A: Art des Beförderten

### 2.4.1.1 Motivation

Für die individuelle Mobilität mit einem Fahrzeug ist heutzutage immer ein Mensch notwendig, der sich in dem Fahrzeug befindet und es dauernd bzw. unter allen Umständen beherrschen muss [6]. Diese Bedingung könnte sich durch die Automatisierung der Fahraufgabe ändern. Die Art des Beförderten stellt außerdem grundlegende Anforderungen an das Fahrzeugkonzept und an das Sicherheitskonzept eines Fahrzeugs.

### 2.4.1.2 Merkmalsausprägungen

1. *kein Fördergut und keine Person* (dadurch keine spezifischen Insassen- oder Transportschutzinteressen)
2. *für Transport aufgegebenes Fördergut*
3. *Person/-en mit abgestimmten Zielen* (Individualverkehr)
4. *Personen mit nicht abgestimmten Zielen* (öffentlicher Verkehr)

Ein Use-Case kann durch mehrere Ausprägungen dieses Merkmals abgedeckt werden. Die Aufteilung in Ausprägung 3 und 4 wird getroffen, um Individualverkehr und öffentlichen Verkehr zu unterscheiden. Ein Fahrzeug des Individualverkehrs befördert Personen mit abgestimmten Zielen. Im Gegensatz dazu befördert ein Fahrzeug des öffentlichen Verkehrs zusätzlich Personen, die nicht zuvor ihre Ziele abgestimmt haben. Mit dem öffentlichen Verkehr erreichen die unterschiedlichen Personen dennoch ihre Ziele, da ein Fahrplan mit Zielen und Zwischenzielen feststeht.

## 2.4.2 Merkmal B: Maximal zulässige Gesamtmasse

### 2.4.2.1 Motivation

Die maximal zulässige Gesamtmasse geht über die kinetische Energie in die Sicherheitsbetrachtung ein. Neben der Sicherheitsbetrachtung erweitert die Betrachtung der Gesamtmasse die Diskussion über den Individualverkehr bis hin zum öffentlichen Verkehr, den Gütertransport und die straßenbauliche Infrastruktur. Zusätzlich adressiert dieses Merkmal auf einer hohen Abstraktionsebene die Frage nach den Fahrzeugtypen, die möglicherweise durch die autonome Fahrfunktion und die sich ändernden Anforderungen nicht mit den aktuellen Fahrzeugtypen übereinstimmen werden. Statt auf die Grenzen der oft länderspezifischen Fahrzeugklassen einzugehen, werden vier Massenangaben gewählt, die von ultraleichten Fahrzeugen bis zu Schwerlastkraftwagen repräsentierenden Werten reichen und jeweils einen Faktor vier voneinander entfernt sind.

### 2.4.2.2 Merkmalsausprägungen

1. *ultraleichte Pkw um 500 kg*
2. *Pkw um 2 t*
3. *leichte Lkw und Transporter um 8 t*
4. *schwere Lkw um 32 t*

Eine diskrete Aufteilung wird eingesetzt, um die fiktiven Use-Cases zu beschreiben und ihre Masse ungefähr einzuordnen. Bei existierenden Use-Cases und definierten Einsatzbereichen ist die exakte Angabe einer Masse möglich.

### 2.4.3 Merkmal C: Einsatzhöchstgeschwindigkeit

#### 2.4.3.1 Motivation

Das Merkmal der Einsatzhöchstgeschwindigkeit (genau genommen das Quadrat der Geschwindigkeit) bestimmt zusammen mit der Masse die maximale kinetische Energie und ist daher ebenfalls zu unterscheiden. Ferner berechnet sich der Bremsweg in den Stand über das Geschwindigkeitsquadrat. Entsprechend steigen die Anforderungen an das vollautomatisierte System für das vorausgesetzte Herbeiführen eines risikominimalen Zustandes im Fehlerfall oder an Funktionsgrenzen mit dem Geschwindigkeitsquadrat.

Neben der Sicherheitsbetrachtung sind die Reisezeit und folglich die bezogen auf den zeitlichen Aufwand noch vertretbare Reichweite als Ergebnis der Einsatzgeschwindigkeit eine die individuelle Mobilität beeinflussende Größe. Zusätzlich beschränkt die Einsatzhöchstgeschwindigkeit gegebenenfalls das Einsatzgebiet des Fahrzeugs, falls bauartbedingte Mindestgeschwindigkeiten auf bestimmten Straßentypen vorgeschrieben sind.

#### 2.4.3.2 Merkmalsausprägungen

1. *bis 5 km/h*
2. *bis 30 km/h*
3. *bis 60 km/h*
4. *bis 120 km/h*
5. *bis 240 km/h*

Die Einsatzgeschwindigkeit wird in fünf Stufen unterteilt, wobei die erste Stufe Schrittgeschwindigkeit charakterisiert und die nachfolgenden sich jeweils um den Faktor zwei voneinander unterscheiden (=Faktor vier in Bezug auf kinetische Energie und Bremsweg). Eine diskrete Aufteilung wird eingesetzt, um die fiktiven Use-Cases zu beschreiben und ihre Einsatzhöchstgeschwindigkeit einzuordnen. Für konkrete Use-Cases ist ein Wert für die Einsatzhöchstgeschwindigkeit unabhängig von den fünf Stufen anzugeben.

## 2.4.4 Merkmal D: Szenerie

### 2.4.4.1 Motivation

Welche räumlichen Gebiete, die dem Fahrzeugführer durch das „Driver-only“-Automobil zugänglich sind, werden auch mit dem beschriebenen Use-Case des autonomen Fahrens befahrbar? Das Merkmal Szenerie beschreibt den räumlichen Einsatzbereich, in dem das Fahrzeug autonom fährt: Existieren beispielsweise genormte Strukturen, wie viele Fahrstreifen sind vorhanden und existieren sonstige Kennzeichnungen?

Bereits die statische Szenerie kann vielseitig sein und eine Herausforderung für den Fahrroboter darstellen. Ein Beispiel dafür sind die oft erwähnten, von Schnee bedeckten Fahrstreifen oder die von Büschen oder Bäumen verdeckten Verkehrszeichen. Diese bei Fahrtbeginn eventuell unbekannt und nicht beeinflussbaren Szenerie-Setups werden nicht bei diesem Merkmal beachtet. Inwiefern der Fahrroboter diese Szenerie-Setups bewältigen kann, ist durch die Annahme beschrieben, dass die Qualität und Erfolgsquote des Fahrroboters bei der Bewältigung der Fahraufgabe denen des menschlichen Fahrers entspricht.

Dieses Merkmal beschreibt folglich auf hoher Abstraktionsebene (Lage, Umfeld und Funktion der Straße) die vorhersehbaren und Regeln folgenden Szenerien.

### 2.4.4.2 Merkmalsausprägungen

#### **Dimension: Art der Szenerie**

1. *Gelände*
2. *Wirtschaftsweg*
3. *Parkplatz bzw. Parkhaus*
4. *Erschließungsstraße*
5. *angebaute Hauptverkehrsstraße*
6. *anbaufreie Hauptverkehrsstraße*
7. *Landstraße*
8. *Autobahn*
9. *Sonderareale*

Das Merkmal Szenerie besitzt in seiner ersten Dimension neun Ausprägungen, die aus der Erweiterung der Richtlinie für integrierte Netzgestaltung [7] hervorgehen. Die Beschreibung der einzelnen Ausprägungen findet sich in Tab. 2.5.

#### **Dimension: Freigabe**

Das Merkmal Szenerie besitzt neben der Ausprägung, innerhalb welcher Szenerie der Use-Case betrieben werden kann, eine zweite Dimension. Diese Dimension bedingt, ob die Szenerie explizit freigegeben werden muss oder nicht.

- a. *Ohne Freigabe erlaubt:* Alle Szenerien dieser Art sind für die autonome Fahrt geeignet, sodass sich der Fahrroboter in diesen Use-Cases frei bewegen kann.
- b. *Nur mit Freigabe erlaubt:* Nur ausgewählte und freigegebene Szenerien dieser Art erlauben dem Fahrroboter die autonome Fahrt in diesem Bereich.

Wer diese Freigabe ausführt, ob es ein privater oder staatlicher Dienst ist, wird zunächst offen gelassen. Ebenso wird zunächst die Art der Freigabe nicht weiter spezifiziert, beispielsweise könnte die Infrastruktur speziell gewartet oder eine Karte mit weiteren Informationen angereichert und bereitgestellt werden. Auch kann die Freigabe eine temporäre Komponente einbeziehen und statische oder dynamische Ausschlusszeiten für bestimmte Szeneriebereiche enthalten.

**Tab. 2.5** Ausprägungen der Szenerie von Merkmal D

Ausprägung	Beschreibung
Gelände (offroad)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• keine genormten oder bekannten Strukturen, wie Fahrstreifen oder sonstige Kennzeichnungen</li> <li>• keine erkennbare Verkehrsregelung</li> <li>• nicht für das Befahren befestigt</li> </ul>
Wirtschaftsweg	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Feldwege, Waldwege und Ähnliches</li> <li>• oft nur minimal befestigte Fahrbahn</li> <li>• öffentlich zugänglich</li> <li>• festgelegte Regeln für Straßenverkehr gelten</li> </ul>
Parkplatz bzw. Parkhaus	<ul style="list-style-type: none"> <li>• explizit für das Parken von Fahrzeugen ausgelegt und beschildert</li> <li>• nicht immer Fahrstreifenmarkierungen, sondern stattdessen genormte Markierung der Verkehrsfläche für das geordnete Abstellen der Fahrzeuge</li> <li>• im urbanen Raum: Parkhäuser mit mehreren Ebenen und teils schmale Auffahrtsrampen und wenig Rangierfreiraum</li> <li>• festgelegte Regeln für Straßenverkehr gelten</li> </ul>
Erschließungsstraße	<ul style="list-style-type: none"> <li>• angebaute Straßen innerhalb bebauter Gebiete, die im Wesentlichen der unmittelbaren Erschließung der angrenzenden bebauten Grundstücke oder dem Aufenthalt dienen</li> <li>• Anbindung (flächenhafte Erschließung) der durch Wohnen, Arbeiten und Versorgung geprägten Ortsteile</li> <li>• grundsätzlich einbahnig</li> <li>• untereinander mit plangleichen Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlagen verknüpft</li> <li>• Verknüpfung mit angebauten Hauptverkehrsstraßen durch plangleiche Knotenpunkte mit oder ohne Lichtsignalanlage oder Kreisverkehre</li> <li>• in besonderen Fällen für öffentlichen Personenverkehr</li> <li>• Aufnahme des wesentlichen Teils des innerörtlichen Radverkehrs</li> <li>• festgelegte Regeln für Straßenverkehr gelten</li> </ul>
angebauter Hauptverkehrsstraße	<ul style="list-style-type: none"> <li>• angebaute Straßen innerhalb bebauter Gebiete, die im Wesentlichen der Verbindung dienen bzw. den Verkehr aus Erschließungsstraßen sammeln</li> <li>• in der Regel Aufnahme von Linien des öffentlichen Personenverkehrs</li> <li>• z. T. Bestandteile zwischengemeindlicher Verbindungen (Ortsdurchfahrten)</li> <li>• einbahnig oder zweibahnig</li> <li>• Verknüpfung mit Straßen der gleichen Kategoriengruppe i. A. durch plangleiche Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage oder Kreisverkehren</li> <li>• z. T. durch Flächen des ruhenden Verkehrs geprägt</li> <li>• festgelegte Regeln für Straßenverkehr gelten</li> </ul>

**Tab. 2.5** (Fortsetzung)

Ausprägung	Beschreibung
anbaufreie Hauptverkehrsstraße	<ul style="list-style-type: none"> <li>• anbaufreie Straßen im Vorfeld oder innerhalb bebauter Gebiete</li> <li>• Verbindungsfunktionen</li> <li>• Straßenseitenräume mit lockeren Bebauung und Einrichtungen der tertiären Nutzung<sup>1</sup>, daher geringe Erschließungsfunktion</li> <li>• einbahnig oder zweibahnig</li> <li>• Verknüpfung mit dem übrigen Straßennetz überwiegend durch plangleiche Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage oder Kreisverkehren</li> <li>• festgelegte Regeln für Straßenverkehr gelten</li> </ul>
Landstraße	<ul style="list-style-type: none"> <li>• anbaufreie Straßen außerhalb bebauter Gebiete</li> <li>• einbahnig mit kurzen zweibahnigen Abschnitten</li> <li>• Verknüpfung mit Straßen der gleichen Kategoriengruppe i. A. durch plangleiche oder planfreie Knotenpunkte</li> <li>• im Wesentlichen Verbindungsfunktion</li> <li>• bei einzelnen unmittelbar an die Straße angrenzenden Gebäuden in geringem Maße Erschließungsfunktion</li> <li>• festgelegte Regeln für Straßenverkehr gelten</li> </ul>
Autobahn	<ul style="list-style-type: none"> <li>• anbaufreie Straßen außerhalb, im Vorfeld und innerhalb bebauter Gebiete</li> <li>• planfreie und teilplanfreie Knotenpunkte</li> <li>• zweibahnig</li> <li>• ausschließlich für schnellen Kraftfahrzeugverkehr</li> <li>• Zufahrt nur über spezielle Anschlussstellen</li> <li>• festgelegte Regeln für Straßenverkehr gelten</li> </ul>
Sonderareale	<ul style="list-style-type: none"> <li>• nicht öffentlich zugänglich</li> <li>• Geometrie ist nicht bekannt</li> <li>• beispielsweise um weiträumiges privates Gelände oder Industrieanlagen</li> <li>• evtl. zusätzliche Infrastruktur für autonomes Fahren (z. B. Containerhäfen mit autonomen Systemen für die Be- und Entladung sowie die Kommissionierung)</li> </ul>

<sup>1</sup> d. h. Nutzung durch Handel und Gewerbe

## 2.4.5 Merkmal E: Dynamische Elemente

### 2.4.5.1 Motivation

Die Komplexität einer Szene hängt neben der Szenerie maßgeblich von den dynamischen Elementen ab. Die dynamischen Elemente, die sich zusätzlich zu dem autonom fahrenden Fahrzeug in der Szene befinden, erweitern die Anforderungen an die (Fahr-)Fähigkeiten des Fahrroboters. Somit beschreibt dieses Merkmal, inwieweit der Use-Case im aktuellen Straßenverkehr eingesetzt werden kann oder ob Einschränkungen bzw. der Ausschluss von dynamischen Elementen vorgesehen ist.

### 2.4.5.2 Merkmalsausprägungen

1. *ohne Ausschluss*
2. *nur Kraftfahrzeuge*
3. *nur autonom fahrende Fahrzeuge*
4. *keine anderen dynamischen Elemente*

Eine Beschreibung der einzelnen Ausprägungen findet sich in Tab. 2.6. Der Ausschluss anderer dynamischer Elemente bei den Ausprägungen 2 bis 4 ist nicht ohne Ausnahme gegeben, wie das folgende Beispiel illustriert: Die Szene auf einer heutigen Autobahn wird beispielsweise durch Ausprägung 2 *Nur Kraftfahrzeuge* beschrieben. Der Fall, dass eine Person oder ein Radfahrer die Autobahn betritt, ist trotzdem möglich, wird aber aufgrund seiner Eintrittswahrscheinlichkeit vernachlässigt. Gemäß der in Abschn. 2.2 (Getroffene Annahmen) genannten gemeinsamen Eigenschaften (Mischbetrieb) werden nur die Ausprägungen 1 und 2 für die Use-Case-Bildung verwendet.

**Tab. 2.6** Ausprägungen des Merkmals E

Ausprägung	Beschreibung
ohne Ausschluss	<ul style="list-style-type: none"> <li>• komplexeste Szene</li> <li>• beinhaltet z. B. Tiere, Fußgänger, Radfahrer, Fahrzeuge, Polizeibeamte</li> </ul>
nur Kraftfahrzeuge	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aufeinandertreffen von autonomen Fahrzeugen und menschgeführten Kraftfahrzeugen</li> <li>• Tiere, Fußgänger usw. nur als extrem seltene Ausnahme behandelt</li> </ul>
nur autonom fahrende Fahrzeuge	<ul style="list-style-type: none"> <li>• exklusive Szenerie für sich autonom bewegende Fahrzeuge</li> </ul>
keine anderen dynamischen Elemente	<ul style="list-style-type: none"> <li>• exklusiv für ein (autonom fahrendes) Fahrzeug</li> </ul>

## 2.4.6 Merkmal F: Informationsfluss zwischen Fahrroboter und anderen Instanzen

### 2.4.6.1 Motivation

Der Fahrroboter erfüllt die Aufgaben der Perzeption, Kognition, Verhaltensentscheidung und Verhaltensaussführung: Dafür werden Informationen über den eigenen Zustand des vom Fahrroboter gesteuerten Fahrzeugs wie beispielsweise Position und Geschwindigkeit, aber auch Informationen über die Umwelt und die Insassen benötigt. Diese Informationen werden entweder durch Sensoren, durch Auslesen eines Speichers oder durch Kommunikation gewonnen. Wie und welche Informationen vom Fahrroboter mit welcher Instanz ausgetauscht werden, ist durch den Zweck des Informationsflusses definiert. Um den Informationsfluss für einen Use-Case zu beschreiben, werden den Use-Cases deshalb die Zwecke des Informationsaustausches zugeordnet.

Die Verfügbarkeit der Information muss der Übertragung sowie den Kommunikationspartnern und dem Einsatzzweck entsprechen. Wie bereits beschrieben, wird zusätzlich davon ausgegangen, dass die Technologie nur sukzessiv Einzug in den Markt hält; somit beherrschen nicht alle dynamischen Elemente in der Umgebung den Informationsaustausch. Der hier betrachtete Informationsfluss des Fahrroboters ist eine Untermenge des gesamten Informationsflusses des Fahrzeugs. Für die Betrachtung werden an dieser Stelle Zwecke, die zu Infotainment und Komfortsteigerung zu rechnen sind, vernachlässigt. Aktuelle Nachrichten, der Zugang zu einem sozialen Netzwerk oder Musikstreamingfunktionen können als Dienstleistungen den Zusatznutzen der autonomen Fahrt steigern, jedoch ist der Informationsfluss durch diese Dienste nicht primär für das autonome Fahren relevant. Deshalb werden nur Zwecke mit Einfluss auf die Verkehrssicherheit, Verkehrseffizienz sowie Zwecke, die eventuell für die autonome Fahrt vorausgesetzt werden, als Unterscheidungsmerkmal der Use-Cases beschrieben.

#### 2.4.6.2 Merkmalsausprägungen

1. *Optimierung der Navigation*
2. *Optimierung der Bahnführung*
3. *Optimierung der Regelung*
4. *Bereitstellen von Umweltinformationen*
5. *Aktualisierung der Fahrroboterfähigkeit*
6. *Fahrroboterüberwachung*
7. *Insassenüberwachung*
8. *Insassennotruf*

Die zu den Ausprägungen gehörigen Beschreibungen sind in Tab. 2.7 gegeben.

Die ersten drei Ausprägungen besitzen zusätzlich das Potenzial, zu Interaktionen zu führen, die einer Verhandlung über die zeitliche und räumliche Nutzung von Verkehrsinfrastruktur entsprechen. Zunächst wird aber darauf verzichtet, diese Interaktionsmöglichkeit weiter zu betrachten.

**Tab. 2.7** Ausprägungen des Merkmals F

Ausprägung	Beschreibung
Optimierung der Navigation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Austausch von für die Navigation relevanten Informationen wie Position, Fahrtziel, Witterung, Fließgeschwindigkeiten usw. mit überregionaler Verkehrszentrale (mehrere 100 km Einzugsgebiet)</li> <li>• Ziele der Optimierung: geringer Energieverbrauch, CO<sub>2</sub>-Ausstoß, möglichst kurze Fahrtzeit/Fahrstrecke etc.</li> </ul>
Optimierung der Bahnführung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Austausch von ausführlichen Informationen über Zustand (<math>x, v, a, \dots</math>) und Intention des durch den Fahrroboter bewegten Fahrzeugs sowie der Fahrzeuge in direkter Umgebung</li> <li>• Teilen von Informationen wie Witterung, Fahrbahnbeschaffenheit, Engstellen, Schaltzeiten von Lichtsignalanlagen (Ampeln) usw. mit einer lokalen Verkehrszentrale (wenige km Einzugsgebiet)</li> </ul>



**Tab. 2.7** (Fortsetzung)

Ausprägung	Beschreibung
Optimierung der Bahnführung	<ul style="list-style-type: none"> <li>synchronisierte Fahrt (eine unter den benachbarten Fahrzeugen abgestimmte Fahrt) im Quer- sowie Längsverkehr (z. B. Kolonnenfahrt, verkehrsregelfreie Kreuzungen, sich anpassende Fahrstreifen etc.) als beispielhafte Zielsetzung</li> </ul>
Optimierung der Regelung	<ul style="list-style-type: none"> <li>Austausch von ausgewählten Fahrzeugzuständen sowie Intentionen des Fahrroboters, der Verkehrsteilnehmer und weiterer Elemente in direkter Fahrzeugumgebung</li> <li>Ziel: Kollisionsvermeidung im Quer- und Längsverkehr mit einem oder mehreren Fahrzeugen der direkten Nachbarschaft entsprechend bereits existierender V2X-Konzepte</li> </ul>
Bereitstellen von Umweltinformationen	<ul style="list-style-type: none"> <li>Teilen von Informationen über die Fahrzeugumwelt, die vom Fahrroboter wahrgenommen wurden, mit den Verkehrsteilnehmern sowie einer Verkehrszentrale in direkter Umgebung</li> <li>Ziel: Bedienung einer optimierten Karte als Informationsquelle für Positionierung, Gefahrenerkennung, Navigation etc.</li> </ul>
Aktualisierung der Fahrroboterfähigkeit	<ul style="list-style-type: none"> <li>Update des Herstellers, das die (Fahr-)Fähigkeiten des Fahrroboters verbessert</li> </ul>
Fahrroboterüberwachung	<ul style="list-style-type: none"> <li>Teilen von Informationen über den Zustand, die Fähigkeiten und die Intentionen des Fahrroboters mit berechtigten Instanzen</li> <li>Ziel: Sicherung von Beweismaterial (Event Data Recording) für die Rekonstruktion eines Unfallhergangs und Mitteilung von Fehlfunktionen oder Gefahrensituationen durch Selbstdiagnose an den Hersteller</li> </ul>
Insassenüberwachung	<ul style="list-style-type: none"> <li>Teilen von Zustandsinformationen (Video, Audio, Herzschlag etc.) über den Beförderten mit einer Notrufzentrale oder einem Dienstleister</li> <li>Weitergabe der Informationen an Berechtigte ohne Aktivität des Insassen</li> <li>Ziel: Überwachung der Gesundheit und Sicherheit des Beförderten</li> </ul>
Insassennotruf	<ul style="list-style-type: none"> <li>aktive Kontaktierung von Notrufzentrale oder Dienstleister durch Insasse im Notfall</li> <li>aktive Entscheidung des Insassen, ob er Informationen teilt oder nicht</li> </ul>

## 2.4.7 Merkmal G: Verfügbarkeitskonzept

### 2.4.7.1 Motivation

Im Normalbetrieb wird das Fahrzeug durch den Fahrroboter innerhalb des zugelassenen Einsatzbereichs autonom bewegt. Erkennt der Fahrroboter eine i.A. nicht vorhersehbare Funktionsgrenze, übergibt der Fahrroboter an ein spezifiziertes Verfügbarkeitskonzept, welches festlegt, wie die Fahrmission fortgesetzt wird. Solche Funktionsgrenzen können beispielsweise durch unbekannte Hindernisse auf der Fahrbahn auftreten, die eine Weiterfahrt innerhalb der Entscheidungsautonomie nicht mehr zulassen. Ein Beispiel für ein solches Hindernis ist ein Ast, der so auf die Fahrbahn ragt, dass das Fahrzeug den Ast berühren muss, um die Fahrt fortzusetzen. In welchem Umfang das Verfügbarkeitskonzept

die komplette Fahraufgabe übernimmt oder dem Fahrroboter nur eine Entscheidung abnimmt, wird bewusst offen gelassen.

#### 2.4.7.2 Merkmalsausprägungen

1. *keine Verfügbarkeitsergänzung*
2. *Verfügbarkeitsfahrer*
3. *teleoperiertes Fahren*
4. *Lotsen-Service*
5. *elektrisches Abschleppen*

In Tab. 2.8 werden die unterschiedlichen Verfügbarkeitskonzepte näher erläutert. Die Übergabe vom Fahrroboter auf das alternative Verfügbarkeitskonzept ist risikominimal umzusetzen. Der Fahrroboter überführt das Fahrzeug für die Übergabe in den risikominimalen Zustand, der für eine Übergabe an das jeweilige Verfügbarkeitskonzept geeignet ist. Die entsprechenden Schnittstellen für den Verfügbarkeitsfahrer, die Fernsteuerung, einen Lotsen oder das Abschleppen müssen zur Verfügung stehen.

**Tab. 2.8** Ausprägungen des Merkmals G

Ausprägung	Beschreibung
keine Verfügbarkeitsergänzung	Abwarten des Fahrroboters, bis durch äußere Einflüsse die Szene wieder beherrschbar und durch die Spezifikationen des Fahrroboters abgedeckt wird
Verfügbarkeitsfahrer	Unterstützung des Fahrroboters durch einen Insassen bei der Bewältigung der Szene (offen, ob durch Übernahme der Fahrfunktion oder durch Manöverkommandos)
teleoperiertes Fahren	Unterstützung des Fahrroboters durch einen Dienstleister bei der Bewältigung der Szene mithilfe einer Fernsteuerung
Lotsen-Service	Unterstützung des Fahrroboters durch eine besonders ausgebildete Person bei der Bewältigung der Szene
elektrisches Abschleppen	Voraussetzung: für Regelungsaufgabe notwendige Hardware funktionsfähig Ansteuerung der Hardware durch Abschleppwagen mittels direkter Verbindung

### 2.4.8 Merkmal H: Erweiterungskonzept

#### 2.4.8.1 Motivation

Mithilfe des autonomen Fahrens werden nicht zwangsläufig, vor allem nicht zu Beginn der Einführung, alle Einsatzbereiche abgedeckt, die für die Bewältigung aller Transportaufgaben benötigt werden. Teilbereiche verbleiben, die nicht autonom bewältigt werden

können. Um dennoch die Mobilitätsbedürfnisse der Kunden zu erfüllen, könnten Bereiche außerhalb des Einsatzbereichs des autonomen Fahrens mithilfe von Erweiterungskonzepten abgedeckt werden. Das Erweiterungskonzept beschreibt, ob und womit es ermöglicht wird, die Fahrzeugführung außerhalb des für autonomes Fahren spezifizierten Einsatzbereichs auszuführen.

### 2.4.8.2 Merkmalsausprägungen

1. *keine Erweiterung*
2. *Fahrer*
3. *teleoperiertes Fahren*
4. *Lotsen-Service*
5. *Extra-Transportmittel*

In Tab. 2.9 werden den einzelnen Konzepten Beschreibungen detaillierter Charakteristiken zugewiesen. Wenn auf das Erweiterungskonzept *Fahrer* gesetzt wird, bedingt dies, dass eine Fahrzeugführungsschnittstelle („Fahrerarbeitsplatz“) zur Verfügung steht. Außerdem wird vorausgesetzt, dass eine fahrtüchtige und autorisierte Person als Insasse die Fahrt außerhalb des Einsatzbereichs des autonomen Fahrens begleitet. Für die anderen denkbaren, aus heutiger Sicht noch futuristisch wirkenden Ausprägungen (*teleoperiertes Fahren* sowie *Lotsen-Service*) ist ein für diese Variante notwendiger Dienst bzw. eine Schnittstelle bereitzustellen.

**Tab. 2.9** Ausprägungen des Merkmals H

Ausprägung	Beschreibung
keine Erweiterung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• der Einsatzbereich wird nicht erweitert</li> <li>• vollständige Abdeckung eines Einsatzbereichs für spezifizierte Transportaufgaben: exklusiv-autonomes Fahrzeug</li> <li>• bei Überdeckung des Einsatzbereichs mit dem von aktuellen Fahrzeugen: vollautonomes Fahrzeug</li> </ul>
Fahrer	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Übernahme der Fahraufgabe durch einen Menschen</li> </ul>
teleoperiertes Fahren	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Übernahme der Fahraufgabe durch einen externen Operator</li> </ul>
Lotsen-Service	<ul style="list-style-type: none"> <li>• siehe Tab. 2.8</li> </ul>
Extra-Transportmittel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Überführen des Fahrroboters an den Grenzen des Einsatzbereichs zu einem Extra-Transportmittel, sodass dieses Transportmittel die Transportaufgabe weiter ausführt</li> <li>• Beispiel: Langstreckentransport von Stadtfahrzeugen mithilfe eines „Autozugs“ oder mithilfe eines Konzepts ähnlich einer elektronischen Deichsel</li> </ul>

### 2.4.9 Merkmal I: Eingriffsmöglichkeiten

Nach Donges [3] müssen die drei primären Fahraufgaben Navigation, Bahnführung und Stabilisierung erfüllt werden, um ein Fahrzeug zu einem Fahrtziel zu führen. Die Stabilisierungsaufgabe wird u. a. bei Löper [1] durch die Regelungsaufgabe („Control Level“) ersetzt: Die Regelungsaufgabe beinhaltet die Stabilisierung, und darüber hinaus besitzt sie die Möglichkeit, das Fahrzeug in einen fahrdynamisch instabilen Zustand zu überführen, mit dem Ziel, die Fahraufgabe zu erfüllen. Somit werden im Folgenden die für den Menschen relevanten Fahraufgaben Navigation, Bahnführung und Regelung betrachtet.

Diese Fahraufgaben werden nach der Definition des vollautomatisierten Fahrens komplett dem Fahrroboter übergeben: Bekommt der Fahrroboter ein Fahrtziel vorgegeben, erfüllt dieser die Navigations-, Bahnführungs- und Regelungsaufgabe und führt das Fahrzeug zu dem Fahrtziel. Zwar muss der Fahrroboter diese Fahraufgaben erfüllen, der Aufbau der Architektur des Fahrroboters ist davon jedoch zunächst unabhängig. Im Gegensatz dazu werden aktuelle Serienfahrzeuge, mit Ausnahme von Gefahrensituationen (ABS, ESC, AEB), durch den menschlichen Fahrer geführt. Dem Menschen wird aktuell immer die Möglichkeit geboten, Assistenzsysteme durch die Betätigung der Stellelemente an seinem Fahrerarbeitsplatz zu korrigieren oder zu übersteuern. Somit existieren zwei Instanzen – der Insasse sowie der Fahrroboter – die prinzipiell die Fähigkeiten besitzen, ein Fahrzeug zu führen.

Zusätzlich existieren Ideen und Konzepte der Fahrzeugfernsteuerung (Tele-Operation), bei denen fahrzeugexterne Instanzen in die Fahrzeugführung eingreifen. Existieren eine Kommunikation und eine entsprechende Schnittstelle für die Fahrzeugaußenwelt, dann besitzen diese externen Instanzen ebenfalls die Möglichkeit, auf die Fahrzeugführung Einfluss zu nehmen. Somit können insgesamt die drei Instanzgruppen *Intern*, *Fahrzeug* und *Extern* die Fahrzeugführung übernehmen.

Für die vereinfachte Beschreibung des Merkmals sind die Insassen (volljährig, minderjährig, Menschen mit einschränkender Behinderung etc.) zur Gruppe *Intern* und die sich außerhalb des Fahrzeugs befindenden Einflussgrößen (hoheitliche Autoritäten (z. B. Polizei), Fahrzeughalter (wenn nicht Teil der Gruppe *Intern*), Bevollmächtigter etc.) zur Gruppe *Extern* zusammengefasst. Werden die Instanzen unabhängig voneinander betrachtet, ergeben sich folgende Fragen bezüglich deren Eingriffsmöglichkeiten:

1. Auf welcher Fahrzeugführungsebene hat die Instanz die *Möglichkeit* einzugreifen?
2. Für welche Fahrzeugführungsebene hat die Instanz die *Befugnis* einzugreifen?

Die erste Frage wird durch das Fahrzeugkonzept des Use-Case beantwortet. Soll die Instanz die Möglichkeit haben einzugreifen, dann wird vorausgesetzt, dass eine geeignete Schnittstelle für diese Instanz im Fahrzeugkonzept vorgesehen ist. Die zweite Frage erfordert eine rechtliche Regelung, die definiert, welche Befugnisse für Instanzen entsprechend deren Eigenschaften und Zuständigkeiten vergeben werden. Wer diese Regeln erstellt und prüft, ob es eine Art Fahrprüfung für die unterschiedlichen Ebenen gibt und Autorisierungen wie Führerschein oder Zugangscodes benötigt werden, soll hier nicht weiter ausgeführt werden.

Daraus folgen unterschiedliche Kombinationen zwischen Möglichkeiten des Eingriffs, die das Fahrzeugkonzept bereitstellt, und der Befugnis eines Eingriffs, die eine Instanz besitzt:

**Tab. 2.10** Kombinationen von Möglichkeiten und Befugnis zur Übernahme der Fahrzeugführung

Variante	Möglichkeit des Eingriffs, vorgegeben durch das Fahrzeugkonzept	Befugnis zum Eingreifen, die die Instanz besitzt
a)	auf allen drei Ebenen (Navigation, Bahnführung und Regelung)	auf allen drei Ebenen
b)	auf allen drei Ebenen	keine (z. B. Minderjähriger als Fahrzeugführer)
c)	keine	auf allen drei Ebenen (z. B. Fahrer auf Rücksitz, der nicht eingreifen kann)
d)	auf einer bestimmten Ebene	auf einer anderen Ebene

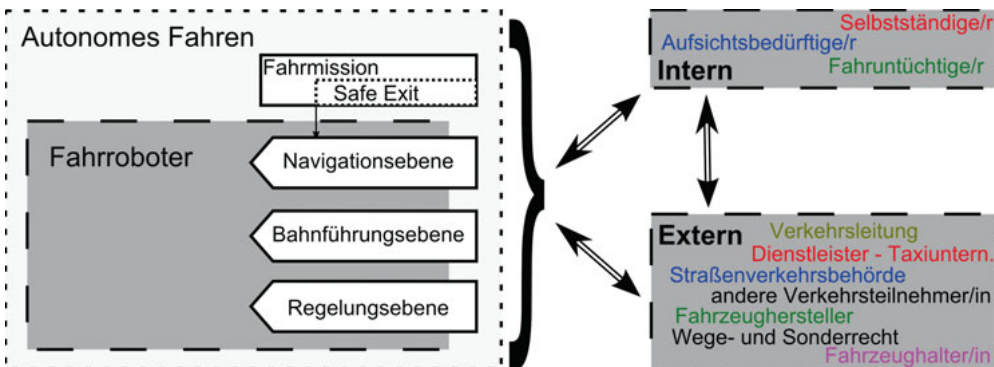
Lediglich Variante a) führt dazu, dass der Fahrroboter durch die Instanz in einer der Ebenen der Fahraufgabe beeinflusst und/oder überstimmt werden kann.

Für die Beschreibung der Use-Cases folgt daraus, dass die Instanzen aufgelistet werden, bei denen mindestens eine Befugnis mit einer angebotenen Möglichkeit durch das Fahrzeugkonzept übereinstimmt.

Zusätzlich wird angenommen, dass durch eine rechtliche Regelung der Missbrauch geahndet und somit verhindert wird. Diese Annahme wird auch bei aktuellen Fahrzeugkonzepten getroffen, weshalb Kinder beispielsweise nicht durch die Technik daran gehindert werden, ein Fahrzeug zu führen, sondern durch eine entsprechende gesetzliche Regelung in Verbindung mit der Aufsichtspflicht.

Werden die Instanzen nun gleichzeitig betrachtet und können folglich die Instanzen gleichzeitig auf den drei Ebenen der Fahraufgabe wirken, stellt sich die dritte Frage:

3. Welche Instanz ist im Konfliktfall des gleichzeitigen Eingriffs dominant und wie ist die Rangordnung zwischen den Instanzen definiert? (s. Abb. 2.9)



**Abb. 2.9** Eingriffskonflikt zwischen Instanzen bei der Ausführung der Fahraufgabe

Um diese Frage für die Beschreibung der Use-Cases zu beantworten, muss der Eingriff der Instanzen mit einer Priorität belegt werden. Welche Instanz dominiert die anderen und bestimmt damit das Fahrzeugverhalten auf den unterschiedlichen Ebenen der Fahraufgabe? Eine Rangordnung der Instanzen ist bei der Fahrzeugauslegung zu implementieren. Dabei ist zu beachten, dass zusätzlich zu der Rangordnung zwischen den Instanzen auch eine Rangordnung zwischen den Ebenen der Fahraufgabe existiert: Die Regelung überstimmt immer die Bahnführung und die Bahnführung immer die Navigationsebene; deshalb ist zusätzlich definiert, dass nur auf einer Ebene durch *Intern* oder *Extern* eingegriffen werden kann. Die Instanz mit der höchsten Priorität unterbindet die anderen Eingriffe.

Mithilfe des autonomen Fahrens besteht die Möglichkeit, dass ausschließlich Personen befördert werden, die nicht die Fähigkeit besitzen, die Fahraufgabe auszuführen oder die Fahrmission zu ändern. Um einem Insassen aber immer die Möglichkeit zu geben, auf schnellstem Weg sicher auszusteigen, ist der Safe-Exit als besondere Fahrmission eingeführt. Bekommt der Insasse auf den Safe-Exit Zugriff mit der höchsten Priorität, kann er zwar das Fahrtziel nicht unbedingt ändern, aber möglichst schnell das Fahrzeug verlassen.

---

## 2.5 Grundlegende Definitionen

Grundlegende Begriffe, die zur Beschreibung der Use-Cases verwendet wurden, sind im Folgenden definiert.

**Assistiert:** Automatisierungsgrad 1 nach Bast [1]: „Fahrer führt dauerhaft entweder die Quer- oder die Längsführung aus. Die jeweils andere Fahraufgabe wird in gewissen Grenzen vom System ausgeführt.“

- Der Fahrer muss das System dauerhaft überwachen.
- Der Fahrer muss jederzeit zur vollständigen Übernahme der Fahrzeugführung bereit sein.“

**Autonomes Fahren:** Die Fahraufgabe nach Donges [3] wird „vollautomatisiert“ ausgeführt. Diese Definition wird erweitert um die Annahme, dass die Ausführung der Fahraufgabe auf Basis maschinell autonomen Verhaltens, innerhalb eines vorher festgelegten Verhaltensrahmens, geschieht.

**Autonomes Fahrzeug:** Das Fahrzeug ist mit einem Fahrroboter ausgestattet und besitzt deshalb die Möglichkeit, autonom zu fahren. Welche Bereiche dieses autonome Fahrzeug abdeckt, ist nicht definiert.

**Bahnführen:** Laut Donges besteht die Bahnführungsaufgabe „(...) im Wesentlichen darin, aus der vorausliegenden Verkehrssituation sowie aufgrund des geplanten Fahrtablaufs die als sinnvoll erachteten Führungsgrößen wie Sollspur und Sollgeschwindigkeit

abzuleiten und antizipatorisch im Sinn einer Steuerung (open loop control) einzugreifen, um günstige Vorbedingungen für möglichst geringe Abweichungen zwischen Führungs- und Istgrößen zu schaffen“. [3]

**Driver-Only:** Automatisierungsgrad 0 nach BASt [1]: „Fahrer führt dauerhaft (während der gesamten Fahrt) die Längsführung (Beschleunigen/Verzögern) und die Querführung (Lenken) aus.“

**Dynamische Elemente:** Dynamische Elemente sind nach Geyer et al. [5] temporal oder spatial variable Elemente wie andere Verkehrsteilnehmer, Zustände von Lichtsignalanlagen, Licht- und Wetterbedingungen.

**Einsatzbereich:** Ein durch die Szenerie explizit und durch die erlaubte Geschwindigkeit implizit spezifizierter räumlicher und/oder zeitlicher Bereich, in dem das Fahrzeug autonom durch den Einsatz des Fahrroboters bewegt werden kann.

**Einsatzgrenze<sup>1</sup>:** Die Einsatzgrenze ist explizit durch die Szenerie und implizit z. B. durch eine Geschwindigkeit spezifiziert und somit eine vorhersehbare Grenzlinie, an der die Fahraufgabe übergeben wird.

**Exklusiv-autonomes Fahrzeug** (autonomous-only vehicle): Ein Fahrzeug, das alle Strecken, für die es als Fahrzeug spezifiziert ist, von Start bis Ziel autonom fährt. Diese Definition geht über die Unterteilung des Automatisierungsgrads des Fahrens (BASt [1]) hinaus und beschreibt das Fahrzeug an sich.

**Fahrer:** Der Fahrer ist der (geschlechtsneutral gemeinte) fahrzeugführende Mensch ohne weitere Spezifikation der Fahrfähigkeit, also innerhalb der Bandbreite der Menschen, die eine Fahrerlaubnis besitzen. Er ist das Subjekt der Autonomie bei nicht vollautomatisiertem Fahren.

**Fahrmission:** Die Fahrmission beschreibt die Fahrt vom Start zum Ziel als Ausführung einer Transportaufgabe.

**Fahrroboter:** Der Fahrroboter ist die Implementation der maschinellen (Fahr-)Fähigkeiten. Der Fahrroboter besteht aus Hardware-Komponenten (Sensoren, Prozessoren und Aktoren) und Software-Elementen. Er agiert als Hard- und Software analog zur Rolle des Fahrers in heutigen Fahrzeugen als Subjekt<sup>2</sup>. (Die Begriffsbildung für dieses System ist nicht abgeschlossen.)

**Funktionsgrenze<sup>3</sup>:** Eine im erlaubten Einsatzbereich auftretende, nicht im Detail vorhersehbare Bedingung, die einer Fortsetzung der autonomen Fahrt entgegensteht. Auch wenn die Grenze nicht vorhersehbar ist, erkennt sie der Fahrroboter dennoch frühzeitig.

**Maschinelle (Fahr-)Fähigkeiten:** Mit den maschinellen (Fahr-)Fähigkeiten sind die Fähigkeiten der Perzeption, Kognition, Verhaltensentscheidung und die Verhaltensausführung gemeint.

---

1 Die Einsatzgrenze entspricht der Systemgrenze Kategorie 1 der BASt-Betrachtung [1].

2 „A system which is capable of taking decisions depending on sensor data processed internally has additional degrees of freedom as compared to one with direct sensor data to actuator feedback or one without any capability of control actuation. The former one is termed a ‘subject’, the last one an ‘object’ (...)“[4]

3 Die Funktionsgrenze entspricht der Systemgrenze Kategorie 2 der BASt-Betrachtung [1].

**Navigieren:** Nach Donges umfasst das Navigieren „(...) die Auswahl einer geeigneten Fahrtroute aus dem zur Verfügung stehenden Straßennetz sowie eine Abschätzung des voraussichtlichen Zeitbedarfs. Wenn Informationen über aktuelle Störeinflüsse wie z. B. Unfälle, Baustellen oder Verkehrsstauungen vorliegen, kann eine veränderte Routenplanung erforderlich werden.“ [3]

**Safe-Exit:** Der Safe-Exit ist eine besondere Fahrmission. Diese überführt das Fahrzeug auf schnellstem Weg in einen Zustand, der es dem Insassen ermöglicht, das Fahrzeug sicher zu verlassen.

**Situation:** Eine eindeutige Definition des Begriffs Situation für die Use-Case-Beschreibung steht noch aus. Insbesondere ist zwischen einer „objektiven, allwissenden Situation(-beschreibung)“ und einer „subjektiven, projektiven Situation(-beschreibung)“ zu unterscheiden.

**Stabilisieren:** Als Erfüllung der Stabilisierungsaufgabe hat nach Donges „(...) der Fahrer durch entsprechende korrigierende Stelleingriffe dafür zu sorgen, dass im geschlossenen Regelkreis (closed loop control) die Regelabweichungen stabilisiert und auf ein für den Fahrer annehmbares Maß kompensiert werden.“ [3]

**Szene:** Die Szene, definiert nach Geyer et al. [5], besteht aus der Szenerie, dynamischen Elementen und optionalen Fahrhinweisen. Eine Szene startet entweder mit dem Ende der vorherigen Szene oder –im Fall der ersten Szene – mit einer definierten Startszene. In einer Szene sind alle Elemente, deren Verhalten und die Position des Ego-Fahrzeugs definiert. Die dynamischen Elemente ändern in einer Szene ihren Zustand.

**Szenerie:** Unter dem Begriff der Szenerie nach Geyer et al. [5] wird die statische Umgebung des Fahrzeugs verstanden. Damit sind u. a. die Geometrie von vordefinierten Straßentypen, die Anzahl an Fahrstreifen, der Straßenverlauf, die Position von Verkehrszeichen und Lichtsignalanlagen sowie weitere statische Objekte, wie z. B. Baustelleneinrichtungen sowie natürliche (z. B. Sträucher und Bäume) oder künstliche Gebilde (z. B. Häuser, Wände) gemeint.

**Transportaufgabe:** Die Transportaufgabe beschreibt den Transport eines definierten Transportgegenstandes (Fahrzeug, Ladegut, Passagier usw.) von einem Startort zu einem Zielort. Beispiele für Transportaufgaben sind ein Fahrzeug zu parken oder einen Passagier zu einem gewünschten Zielort zu bringen.

**Vollautomatisiert:** Automatisierungsgrad 4 nach Bast [1]: „Das System übernimmt Quer- und Längsführung vollständig in einem definierten Anwendungsfall.“

- Der Fahrer muss das System dabei nicht überwachen.
- Vor dem Verlassen des Anwendungsfalles fordert das System den Fahrer mit ausreichender Zeitreserve zur Übernahme der Fahraufgabe auf.
- Erfolgt dies nicht, wird in den risikominimalen Systemzustand zurückgeführt.

Systemgrenzen werden alle vom System erkannt, das System ist in allen Situationen in der Lage, in den risikominimalen Systemzustand zurückzuführen.“



**Vollautonomes Fahrzeug:** Ein solches Fahrzeug kann auf gleichem Niveau wie „Driver-only“-Fahrzeuge nahezu alle Strecken autonom fahren. Diese Definition geht über die Unterteilung des Automatisierungsgrads des Fahrens (BASt [1]) hinaus und beschreibt das Fahrzeug an sich.

---

## Literatur

1. Gasser, T.M., Arzt, C., Ayoubi, M., Bartels, A., Bürkle, L., Eier, J., Flemisch, F., Häcker, D., Hesse, T., Huber, W., Lotz, C., Maurer, M., Ruth-Schumacher, S., Schwarz, J., Vogt, W.: Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung. Gemeinsamer Schlussbericht der Projektgruppe. Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen – Fahrzeugtechnik (F), vol. 83. Wirtschaftsverl. NW Verl. für neue Wissenschaft, Bremerhaven, 2012
2. Anlehnung an das Autonomieverständnis nach Kant interpretiert durch Feil, E.: Autonomie und Heteronomie nach Kant. Zur Klärung einer signifikanten Fehlinterpretation. In: Freiburger Zeitschrift für Philosophie und Theologie, 29/1–3, 1982, S. 389–441 (abgedruckt in Feil, E. Antithetik neuzeitlicher Vernunft. „Autonomie – Heteronomie“ und „rational – irrational“, Göttingen 1, Teil I, S. 25–112)
3. Donges, E.: Fahrerverhaltensmodelle. In: Winner, H. et al.: Handbuch Fahrerassistenzsysteme. 2. Auflage, S. 15–23, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2012
4. Dickmanns, E.D.: Subject-object discrimination in 4D dynamic scene interpretation for machine vision. In: [1989] Proceedings. Workshop on Visual Motion, Irvine, CA, USA, 20–22 March 1989, pp. 298–304. doi: 10.1109/WVM.1989.47122
5. Geyer, S.; Baltzer, M.; Franz, B.; Hakuli, S.; Kauer, M.; Kienle, M.; Meier, S.; Weißgerber, T.; Bengler, K.; Bruder, R.; Flemisch, F. O.; Winner, H.: Concept and Development of a Unified Ontology for Generating Test and Use-Case Catalogues for Assisted and Automated Vehicle Guidance. IET Intelligent Transport Systems. Zur Veröffentlichung angenommen. 2013
6. Kempen, B.: Fahrerassistenz und Wiener Weltabkommen. In: 3. Sachverständigentag von TÜV und DEKRA: Mehr Sicherheit durch moderne Technologien, 25./26. Februar 2008 in Berlin
7. Kategorien der Verkehrswege für den Kfz-Verkehr (3.4.1) aus den Richtlinien für integrierte Netzgestaltung Ausgabe 2008
8. Löper, C.; Flemisch, F.: Ein Baustein für hochautomatisiertes Fahren: Kooperative, manöverbasierte Automation in den Projekten H-Mode und HAVEit. 6. Workshop Fahrerassistenzsysteme in Hößlinsülz, 2009

# Human and Machine

J. Christian Gerdes

The very act of driving conjures a range of strong and very human emotions. Whether it is the feeling of freedom that the mobility of the car provides, the frustration of being stuck in traffic, the panic when realizing a potential collision looms or the joy of an open road with a favorite song on the radio, driving is a human experience. With automated vehicles, however, that experience changes – both for passengers in the automated car and other road users who have to walk or drive alongside it as part of the social experience of traffic. The car ceases to be simply an extension of its human driver and becomes an agent in its own right, navigating through the highways and rules of human society. Given the sometimes uneasy relationship between humans and machines, what will these new interactions between humans and machines look like?

Fabian Kroeger sets the stage for this discussion by showing what our cultural heritage reflects about our views of automation. In his chapter, *Das automatisierte Fahren im gesellschaftsgeschichtlichen und kulturwissenschaftlichen Kontext*, he details the long history of automated vehicle concepts and their treatment in media, beginning with Utopian visions of the benefits of such technology. His chapter traces the path from this early optimism towards the more cautionary themes found in recent film depictions of our automated future. This frames a central question running through the remaining chapters – how can the challenges of human-machine interaction be overcome to realize the promise of this technology?

A key aspect of that interaction is how automated cars will conform to the ethical standards of the human world in which they operate. Patrick Lin opens this topic with an overall discussion of *Why Ethics Matters for Autonomous Cars*. Even with the best technology imaginable, sometimes crashes will be unavoidable for automated vehicles that share the road with human drivers and programmers must decide what to do when presented with such dilemma situations. As Lin shows, such decisions raise issues of equity, discrimination and unintended consequences that must be thoughtfully considered. Christian Gerdes and Sarah Thornton take the programming aspect of this discussion a step further with *Implementable Ethics for Automated Vehicles*. Mapping philosophical concepts to engineering

concepts, they demonstrate how different approaches to ethical reasoning can be turned into algorithms that make decisions for automated vehicles. The correct choice of an ethical framework for automated vehicles is far from obvious, however, and they argue that there are benefits to taking a more deontological, or rule-based, approach to dilemma situations and a more consequentialist, or outcome-based approach to operating in traffic.

Interactions in traffic and societal acceptance depend not only upon the programming in the automated vehicles but how the automated vehicles are understood – or misunderstood – by the people around them. Ingo Wolf, in his chapter *Wechselwirkung Mensch und autonomer Agent*, discusses the psychological concept of a mental model and how such models can be critical in defining human interactions with automated systems. He outlines several possible mental models for interactions between humans and automated vehicles and, using the results of an online survey, shows which are closest to current perceptions of this technology.

This section concludes with a look at the specific challenge presented by the informal communication channels that humans use to interpret the intentions to other road users or signal their own intentions. Berthold Färber demonstrates the importance of nonverbal communication such as eye contact and gesture in his chapter *Kommunikationsprobleme zwischen autonomen Fahrzeugen und menschlichen Fahrern*. This raises a range of questions such as how eye contact with someone in the driver seat of an automated vehicle who is not actually driving may be interpreted and what possibilities for new communication modalities might exist.

---

# Das automatisierte Fahren im gesellschaftsgeschichtlichen und kultur- wissenschaftlichen Kontext

3

Fabian Kröger

## Inhaltsverzeichnis

3.1	Einleitung	42
3.2	Frühe Flugzeug- und Radiotechniken legen die Grundlagen	43
3.3	Die technischen Anfänge: fahrerlos, aber nicht selbst steuernd	44
3.4	Zwischen Wunderbarem und Unheimlichem	45
3.5	Erst ein fahrerloses Auto ist ein sicheres Auto	46
3.6	Die Leitdrahtvision wird zum utopischen Leitbild	47
3.7	Der selbst gesteuerte Verkehr im Futurama von General Motors	49
3.8	Die Ästhetisierung der Leitdrahtvision	50
3.9	Die Inszenierung der Familie im selbst steuernden Fahrzeug	52
3.10	Das Interstate-System und der Traum vom Magic Highway	53
3.11	Die technische Realisierung der Leitdrahtvision und ihre bildliche Vermittlung	54
3.12	Die Cruise Control als Nebenprodukt der Technik-Utopie	56

---

F. Kröger (✉)

CNRS, ENS, Université Paris I Panthéon-Sorbonne, Institut d'histoire moderne et contemporaine (IHMC), Equipe d'histoire des techniques, Frankreich  
fabian.kroger@gmail.com

<b>3.13 Die unheimliche Verlebendigung der Maschine</b> .....	57
<b>3.14 Das fahrerlose Automobil im Film</b> .....	57
<b>3.15 Vom freundlichen Helfer zur Killermaschine</b> .....	58
<b>3.16 Das Aufkommen der Mikroelektronik und die Abkehr von der Leitkabelkonzeption</b> .....	59
<b>3.17 Knight Rider und die Bordelektronik</b> .....	60
<b>3.18 Autonome Fahrzeuge im Science Fiction-Film</b> .....	61
<b>3.19 Das Ende des Fluchtwagens im Vollautomaten ohne Interface</b> .....	61
<b>3.20 Die Wahl des Steuerungsmodus per Stimme oder Knopfdruck</b> .....	62
<b>3.21 Warum die Fernsteuerung weniger Angst macht</b> .....	63
<b>3.22 Zusammenfassung und Ausblick</b> .....	64
3.22.1 Bereitet uns Siri auf Iris vor? .....	65
<b>Literatur</b> .....	65
<b>Filmografie</b> .....	67

---

## 3.1 Einleitung

Die Faszination des automobilen Autonomieversprechens basiert historisch vor allem auf der Kontrolle des menschlichen Fahrers über Gaspedal, Lenkrad und Bremse. Das Lenken eines Autos sei der einzige Bereich, „wo dem Machtrausch und der Erfindungsgabe noch ein freier Raum“ verbleibe, beobachtete der Semiotologe Roland Barthes 1963 ([3], S. 241). Auch der Soziologe Henri Lefebvre betonte, das Automobil sei das letzte Refugium von Zufällen und Risiko in einer zunehmend kontrollierten und verwalteten Gesellschaft ([19], S. 103).

Hinter diesem Risiko verbirgt sich jedoch nicht nur die Freiheit, es drohen auch tödliche Unfälle. In diesem Sinne „teilt und konterkariert“ das Automobil „die Utopien der Moderne“, hebt die Kulturwissenschaftlerin Käte Meyer-Drawe hervor ([23], S. 111f.).

Neben das Phantasma des selbst lenkenden Menschen tritt deshalb schon früh der Traum des sich selbst steuernden Autos, das uns ohne Unfall zum gewünschten Ziel bringt. Erstaunlich ist, dass die Realisierung dieser Wunschfantasie seit fast 100 Jahren immer 20 Jahre entfernt geblieben ist ([42], S. 14). Zwischen einem Automobil, das von einem Fahrer gesteuert wird, und einem Automobil, das einen Passagier transportiert, besteht offenbar nicht nur ein technologischer, sondern vor allem ein kultureller Bruch. Fahrerlose Fahrzeuge bevölkern in erster Linie das Imaginäre der Technik, ihre Geschichte ist vor allem eine Bildgeschichte.

Der folgende Beitrag zeichnet einige der zentralen Elemente der fast hundertjährigen Bild- und Technikgeschichte des fahrerlosen Automobils aus einer kulturwissenschaftlichen Perspektive nach (vgl. auch [18]). Im Zentrum des Interesses steht dabei das Verhältnis von technischen und bildlichen Entwürfen, von industriellen Forschungsprojekten und kulturellen Imaginationen. Es wird gezeigt, wie sich die Logik des automatischen Automobils als fantastisches Objekt zwischen Wunderbarem und Unheimlichem entfaltet.<sup>1</sup>

---

## 3.2 Frühe Flugzeug- und Radiotechniken legen die Grundlagen

Die Geschichte des fahrerlosen Automobils beginnt Anfang des 20. Jahrhunderts in den USA. Zu dieser Zeit wurde der starke Anstieg tödlicher Verkehrsunfälle zu einem immer größeren gesellschaftlichen Problem. Die Massenmotorisierung hatte in den USA schon in den 1920er-Jahren begonnen – drei Jahrzehnte früher als in Europa. Allein in den ersten vier Jahren nach dem Ersten Weltkrieg wurden mehr US-Amerikaner bei Autounfällen getötet, als zuvor in Frankreich gefallen waren ([27], S. 25). Insgesamt führte der motorisierte Straßenverkehr in den 1920er-Jahren zum Unfalltod von etwa 200.000 US-Bürgern, die weitaus größte Zahl davon waren Fußgänger ([27], S. 21).

Das Fehlverhalten der Autofahrer wurde als Hauptunfallursache ausgemacht. Dass Infrastruktur und Fahrzeugkonstruktion ebenfalls entscheidende Faktoren der Unfallausprägung und -schwere sind, wurde erst wenig in Rechnung gestellt. Die Idee einer maschinellen Substitution menschlicher Fehleranfälligkeiten drängte sich also geradezu auf.

Zu den materiellen Bedingungen, die ein unfallfreies, sich selbst steuerndes Automobil überhaupt erst denkbar machten, gehörten zwei neue technische Entwicklungen aus dem Bereich der Luftfahrt und der Radiotechnik:

Als Erstes stellte Lawrence B. Sperry (1892–1923) im französischen Bezons nahe Paris im Juni 1914 den ersten gyroskopischen *Airplane Stabilizer* für Flugzeuge vor, der heute als erster Autopilot gilt. Vor den Augen staunender Zuschauer stieg sein Mechaniker während des Fluges auf den rechten Flügel, während Sperry im Cockpit aufstand und seine Hände über den Kopf hob. Das System basierte auf dem Gyrokompass, den sein Vater Elmer A. Sperry (1860–1930) erfunden hatte ([6], S. 183). Es balancierte das Flugzeug automatisch aus, nahm dem Piloten allerdings noch nicht völlig das Steuern ab. John Hays Hammond (1888–1965) stellte etwa zur gleichen Zeit ein System zur automatischen Kursstabilisierung vor. Die Erfindungen von Sperry und Hammond bereiteten der Kommerzialisierung des Autopiloten den Weg ([7], S. 1253 ff.; [13], S. 1258 ff.).

Zweitens stellte der Beginn der Radiotechnik eine der technischen Voraussetzungen dar, um ein selbst steuerndes Automobil realisieren zu können. Die neue Wissenschaft der *Radioguidance* befasste sich mit der Fernsteuerung beweglicher Mechanismen mittels

---

<sup>1</sup> Die Bezeichnungen selbst steuerndes, automatisches und autonomes Fahrzeug werden hier synonym verwendet.

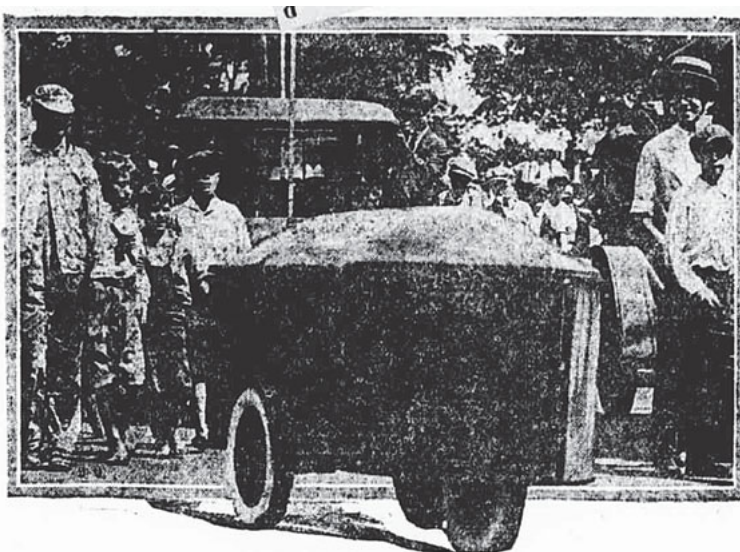
Funkwellen ([12], S. 171). Entwickelt wurde diese Technologie u. a. vom US-Militär, das mit ferngesteuerten Torpedos, Schiffen und Flugzeugen experimentierte.

### 3.3 Die technischen Anfänge: fahrerlos, aber nicht selbst steuernd

Diese Pionierarbeiten führten zum ersten fahrerlosen Automobil, das die Ingenieure des Radio Air Service auf dem McCook-Luftwaffentestgelände in Dayton, Ohio, am 5. August 1921 der Öffentlichkeit vorstellten.

Das 2,5 Meter lange Gefährt (s. Abb. 3.1) wurde per Funk aus einem 30 Meter hinter ihm fahrenden Armeelastwagen gesteuert. Genau genommen handelte es sich also noch nicht um ein autonom selbst lenkendes, sondern um ein ferngesteuertes Fahrzeug – der Fahrer befand sich lediglich außerhalb des Wagens. Festzuhalten ist hier, dass die Geschichte des fahrerlosen Automobils von Beginn an mit dem Militär als Akteur verbunden ist und dass es sich von Anfang an um eine Mediengeschichte handelt: Die Presse berichtete darüber und veröffentlichte Fotos des Prototyps [28].

1925 sorgte ein weiteres ferngesteuertes Auto namens *American Wonder* für Aufsehen, als es über den New Yorker Broadway fuhr [32].<sup>2</sup> Es war von der Firma Houdina Radio Control entwickelt worden. Auch hier spielte militärisches Know-how eine Rolle: Francis P. Houdina hatte als Elektrotechniker in der US-Armee gearbeitet. Auch das *American Wonder* wurde aus einem zweiten Fahrzeug per Funkfernsteuerung gelenkt.



**Abb. 3.1** Das erste ferngesteuerte Fahrzeug (USA 1921) (Foto aus: [33])

<sup>2</sup> Durch einen fehlerhaften OCR-Scan des TIME-Artikels wurde der Name American Wonder zu Linrrican Wonder verfälscht. Dies ist in zahlreichen Artikeln übernommen worden.



**Abb. 3.2** Ferngesteuertes Fahrzeug bei einer Safety Parade (USA 1930er-Jahre) [30]

In den 1930er-Jahren traten verschiedene Ableger dieses ferngesteuerten Automobils in der Öffentlichkeit auf. Zum einen wurde es wegen seiner aufmerksamkeitsökonomischen Qualitäten als kommerzieller Werbeträger eingesetzt. Zum anderen bekam es unter der Leitung des Funktechnikers Captain J. J. Lynch eine führende Rolle bei sogenannten *Safety Parades* (s. Abb. 3.2) für die Straßenverkehrssicherheit.

Von 1931 bis 1940 führte Lynch das ferngesteuerte Fahrzeug in 37 von 48 US-Bundesstaaten vor. 1934 zeigte er den Wagen sogar in Australien. Bremse, Lenkung und Hupe des vor ihm fahrenden Fahrzeugs betätigte er mithilfe einer Morsetaste. Der Code wurde über eine kugelförmige Antenne empfangen, es gibt aber auch Berichte über ein Kabel zwischen den Fahrzeugen. In Buffalo und auf dem Utica Airport wurde das Auto 1933 sogar von einem Flugzeug aus ferngesteuert.

Für Verkehrssicherheitskampagnen bot sich das fahrerlose Auto in geradezu idealer Weise an. Die Sicherheit des modernen Automobils hänge vom Fahrer ab, betonte Lynch anlässlich einer Fahrsicherheitskampagne. Da das fahrerlose Automobil alle Verkehrsregeln beachte, diene es den Autofahrern als Vorbild.

---

### 3.4 Zwischen Wunderbarem und Unheimlichem

Die Presse kündigte das ferngesteuerte Automobil als *phantom auto* [29], *robot car* [31] oder *magic car* [30] an. Diese Metaphern zeigen, dass das fahrerlose Automobil schon früh als fantastisches Objekt wahrgenommen wurde. Es nimmt bis heute genau jenen Platz zwischen Wunderbarem und Unheimlichem ein, den Tzvetan Todorov der phantastischen Literatur zuschrieb [39].

„Wir sausten los, ohne daß jemand das Steuerrad hielt, flitzten um Ecken, wichen andern ebenso feinen Kraftkutschen aus, niemand hupte.“ ([16], S. 7f.). Der deutsche Schriftsteller



Werner Illing beschreibt in seiner frühen Automatisierungsutopie *Utopolis* (1930) das Wunderbare der „geheimnisvoll von selbst lenkenden Autos“ ([16], S. 37). Wir werden in eine Gesellschaft versetzt, in welcher „der Maschinen-Automat das Werk der Hand“ ([16], S. 19) ersetzt hat – und somit auch das Steuerhandwerk. „Das Wunderbarste [sic!] daran war, daß der Wagen ... sich so benahm, als hätte er sämtliche nur denkbaren Verkehrsvorschriften auswendig gelernt.“ ([16], S. 38). Wie bei Lynchs *Safety-Shows* in den USA besteht der besondere Reiz des fahrerlosen Autos auch hier im Einhalten sozialer Normen.

Auch die technische Seite dieser literarischen Utopie wird erklärt. Jeder Wagen habe vorne ein kleines Prismenauge, das mit „unauffällig in die Hauswände eingelassen(en)“ Ampeln kommuniziere. „Durch wechselnde Spiegelreflexe regulieren diese mechanischen Augen Geschwindigkeiten und Lenkung.“ [16] Auch ein Navigationssystem gibt es, das an heutige GPS-Geräte erinnert:

An Stelle des Lenkrads fand ich eine Metallplatte, in die sehr fein und deutlich der Stadtplan eingezätzt war. Darüber einen nagelscharfen Zeiger. Kaum hatte ich diesen ein wenig verschoben, fuhr der Wagen an und jagte durch Straßen, die ich noch nicht kannte. ([16], S. 38)

Auf die Beschreibung des Wunderbaren selbst lenkender Automobile folgt die literarische Ausschmückung seines unheimlichen Potenzials. Der US-amerikanische Science Fiction-Autor David H. Keller beschreibt in seiner Kurzgeschichte *The Living Machine* (1935) die Erfindung eines selbstfahrenden Autos, das mit Sprachbefehlen navigiert werden kann [17]. Zunächst werden die Vorteile genannt. Die „lebendige Maschine“ habe zur Senkung der Unfallzahlen beigetragen und das Auto neuen Nutzerschichten geöffnet ([17], S. 1467):

Alte Menschen begannen, den Kontinent in ihren eigenen Autos zu überqueren. Junge Leute nutzten das fahrerlose Auto zum Petting. Blinde befanden sich zum ersten Mal in Sicherheit. Eltern konnten ihre Kinder in dem neuen Auto sicherer zur Schule schicken, als in den alten Autos mit Chauffeur.“ ([17], S. 1470, Übers. d. A.)

Die Geschichte schlägt um, als ein Mechaniker bemerkt, dass die Autos lebendig geworden sind. „Autos, außer Kontrolle, rasten die öffentlichen Straßen entlang, jagten Fußgänger, töteten kleine Kinder, überfahren Zäune.“ ([17], S. 1473, Übers. d. A.) Dieses imaginäre Phantasma des Kontrollverlusts über die fahrerlosen Maschinen wird sich als dominantes Muster durch das 20. Jahrhundert ziehen.

---

### 3.5 Erst ein fahrerloses Auto ist ein sicheres Auto

Seinen ersten filmischen Auftritt hat das fahrerlose Automobil im US-amerikanischen Verkehrserziehungsfilm *The Safest Place* (1935). Der von General Motors (GM) in Auftrag gegebene und von Jam Handy (1886–1983) produzierte Kurzfilm zeigt ein Auto ohne Fahrer, das mustergültig die Verkehrsordnung einhält. Dieses Fahrzeug bleibt immer in der

Spur, vergisst beim Abbiegen nie zu blinken, beachtet alle Stoppzeichen und überholt nie in gefährlichen Kurven. Ähnlich hatte auch Lynch begründet, weshalb er mit fahrerlosen Fahrzeugen für Sicherheit warb.

*The Safest Place* inszeniert die Vision des selbstfahrenden Autos nicht als technisch realisierbare Möglichkeit, sondern als moralisches Denkmodell. Es ist allein der Fahrer, der in diesem Film für Unfälle verantwortlich gemacht wird. Er sei für die Sicherheit viel bedeutsamer als die Technik – gerade deshalb soll er sich wie ein Automat verhalten.

Der blinde Fleck des Films ist die Maschine: Sie wird nicht als Risikofaktor begriffen. Es bleibt ausgeblendet, dass Unfälle auch passieren, wenn der Fahrer keine Fehler macht. Dies ist nicht verwunderlich, denn damals war die Autoindustrie noch nicht davon überzeugt, Sicherheitsforschung betreiben zu müssen ([37], S. 161). Visuell bringt der Film dieses Paradox der unfehlbaren Maschine eindrucksvoll auf den Punkt: Die Kamera filmt den Innenraum des Wagens von der Rückbank aus. Wie von Geisterhand dreht sich das Lenkrad, die Vordersitze sind leer.

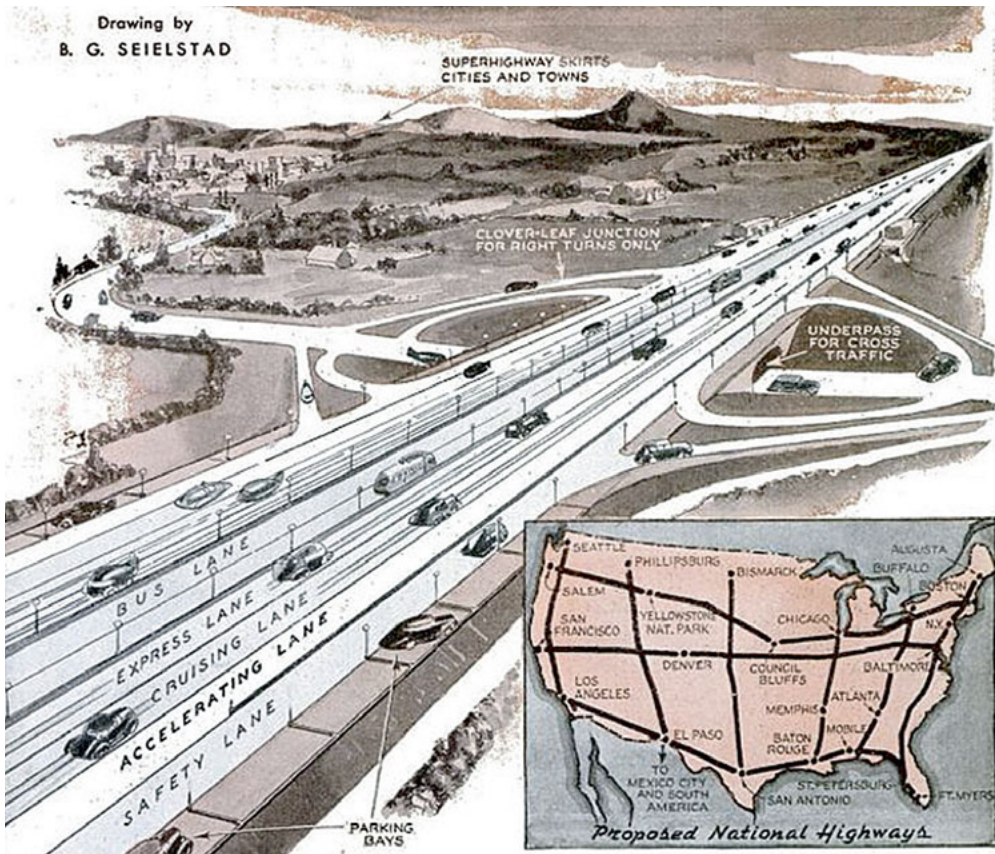
Bemerkenswert ist diese Einstellung, da sich das selbst lenkende Auto aller Fahrzeuginsassen entledigt zu haben scheint. Ihre Körper sind aus dem Wagen und aus dem Bild genommen worden. Sie sitzen nun außerhalb des Wagens im Kino, vor der Leinwand. Nur ihr Blick erlaubt es den Zuschauern, sich als visuell Reisende wieder in den Wagen hineinzuversetzen. Damit spitzt der Film den Widerspruch zwischen Sicherheit und Freiheit auf ironische Weise zu: Ist das Auto erst sicher, wenn es leer ist?

---

### 3.6 Die Leitdrahtvision wird zum utopischen Leitbild

Nicht nur literarische und filmische Fantasien kreisen um das fahrerlose Auto. Etwa zur gleichen Zeit – Mitte der 1930er-Jahre – begann die US-amerikanische Öl- und Automobilindustrie gemeinsam mit Stadtplanern, Industriedesignern, Architekten, Verkehrswissenschaftlern und Vertretern der Politik an futuristischen Entwürfen künftiger Highways zu arbeiten ([42], S. 2). Das automatische Fahren löste sich nun von den frühen Fernsteuerungsversuchen und avancierte unter dem Vorzeichen eines automatisierten Verkehrssystems zum utopischen Leitbild. Die Idee der automatisierten Straße wurde auf reale Landschaften projiziert, eine sofortige Umsetzung war aber nicht geplant. Vielmehr sollte ihre Strahlkraft dazu beitragen, das Vertrauen in den Kapitalismus wiederherzustellen. Viele US-Bürger hatten im Zuge der großen Depression den Glauben an den technologischen Fortschritt verloren. Die Elite der Planer war deshalb auf propagandistische Verstärker angewiesen, die den technischen Heilsversprechen ihren Glanz zurückgeben sollten.

Bei dieser Aufgabe spielten populärwissenschaftliche Magazine wie *Popular Science* und *Popular Mechanics* eine wichtige Rolle. Sie arbeiteten stark mit Bildern, was sie zu wertvollen Quellen für bildhistorische Analysen macht. Im Mai 1938 berichtete *Popular Science* erstmals über den automatischen Verkehr der Zukunft [26]. Der Autor stellte die sogenannte Leitdrahtvision vor, die bis in die 1970er-Jahre kulturelles Leitbild bleiben



**Abb. 3.3** Eine der ersten Abbildungen einer automatischen Autobahn (Ausschnitt, Zeichnung: B. G. Seielstad; [26], S. 28)

sollte: Alle Fahrzeuge folgten einem in die Fahrbahn versenkten elektromagnetischen Kabel, dessen Impulse Geschwindigkeit und Steuerung regulierten ([26], S. 28). Begründet wurde dieser Entwurf damit, das „Schlachten“ beenden zu müssen, das durch menschliche Fahrfehler und schlechte Straßen verursacht werde ([26], S. 118). Erstaunlicherweise sieht schon diese frühe Leitdrahtvision den Wechsel zwischen automatischer und manueller Steuerung vor ([26], S. 27).

Von besonderem Interesse ist hier die begleitende Zeichnung des Illustrators Benjamin Goodwin Seielstad (1866–1960), da sie eine utopische Bildsprache entwickelt, die über Jahrzehnte immer wieder in Zusammenhang mit dem automatischen Fahren auftauchen wird (s. Abb. 3.3).

Zunächst schauen wir aus der Vogelperspektive auf die Autobahn der Zukunft, die in einer schnurgeraden Fluchtlinie gen Horizont führt. Die weiß leuchtenden Fahrbahnen vereinigen sich am zu überschreitenden Horizont des Panoramas. In dieser Perspektive ist ein emphatischer Fortschrittsfeil hin zum besseren Morgen enthalten. Der strategisch

eingesetzte Fluchtpunkt betont die Aussage dieses Bildes: Indem er sich mit dem Betrachter bewegt und somit unerreichbar ins Nirgendwo flüchtet, besitzt er eine Affinität zum Utopischen.

Des Weiteren unterstreicht der überaus hoch liegende Augenpunkt die Bedeutung des Panoramas. Der Blick auf die Autobahn scheint aus der Perspektive eines Heißluftballons zu stammen. Die visuelle Distanz unterstreicht den Entwurfscharakter dieser Vision, die wir mit Ernst Bloch eine utopische „Wunschlandschaft“ ([5], S. 935) nennen können.

*Popular Science* erläutert die im Artikel aufgezeigte Vision mit Berufung auf Miller McClintock (1894–1960), Direktor des Büros für Street Traffic Research der Harvard Universität. McClintock war einer der wichtigsten Vordenker der US-Verkehrsplanung [27]. In seiner Dissertationsschrift *Street Traffic Control* analysierte er bereits 1925 die Ursachen für Staus und Unfälle und entwickelte neue Verkehrsregeln und Straßenbaumaßnahmen [22].

Ein bedeutsamer Anstoß für das automatische Fahren kam von einer großen Mineralölgesellschaft: Im Frühjahr 1937 brachte der Mineralölkonzern Shell McClintock mit dem Stromlinienpionier Norman Bel Geddes zusammen. Für eine Shell-Werbeanzeige sollten sie gemeinsam ein Modell der *City of Tomorrow* entwerfen ([27], S. 249). Bel Geddes hatte schon 1932 in seinem Buch *Horizons* über Urbanismus und Autodesign geschrieben [4], aber erst der Shell-Auftrag brachte ihn dazu, die Vision eines automatischen Highways zu entwickeln. Im Mai 1938 gelang es Bel Geddes dann, den GM-Konzern davon zu überzeugen, das Shell-Modell für die New Yorker Weltausstellung von 1939 weiterzuentwickeln.

---

### 3.7 Der selbst gesteuerte Verkehr im Futurama von General Motors

„Strange? Fantastic? Unbelievable? Remember, this is the world of 1960!“ ([9], S. 8). Auf der World’s Fair erhielt die Utopie des fahrerlosen Automobils erstmals eine große Bühne. *Building the World of Tomorrow* lautete das Motto der Messe, die eine technologisch verbesserte Zukunft versprach, während der Alltag von wirtschaftlicher Depression und Ahnungen eines drohenden Krieges geprägt war. Die populärste Show der World’s Fair war das heute legendäre *Futurama* von GM mit seinem Modell des Verkehrs der Zukunft. Der Begriff *Futurama* ist vom griechischen *horama* (dt.: Sicht) abgeleitet. Um in die Zukunft sehen zu können, mussten die Messebesucher das von dem Architekten Albert Kahn (1869–1942) entworfene stromlinienförmige Gebäude über gebogene Rampen betreten, in deren Ästhetik neben den künftigen Superhighways die schon genannte utopische Fortschrittsbahn wiederzuerkennen war.

Im Inneren standen 552 Plüschessel bereit, die auf ein Fließband montiert waren. In ihnen schwebten die Besucher 16 Minuten lang über eine 3000 Quadratmeter große, gigantische Modelllandschaft, die Bel Geddes entworfen hatte. Das sieben Millionen Dollar teure Diorama umfasste eine halbe Million Häuser, eine Million Bäume und 50.000 Spielzeugautos ([21], S. 110; [25], S. 74). Über Lautsprecher wurde den Besuchern erläutert, was

sie unter sich sehen konnten: 10.000 animierte Modellautos, die über eine 14-spurige Autobahn rasten, verkörperten den automatischen Verkehr von Morgen, der von Radiowellen in der Spur gehalten wurde. Nur Tankstellen fehlten, sie hätten an die Abhängigkeit dieser Vision vom Öl erinnert. Auch Kirchen suchte man vergebens, denn das gesamte Futurama war bereits ein Ort der *worship*, der Huldigung eines technischen Transzendenzversprechens.

Mit dieser Inszenierung setzte Bel Geddes, der bis 1927 beim Theater gearbeitet hatte, ähnlich wie *Popular Science* auf ein Primat des Visuellen: „Einer der besten Wege, um eine Lösung jedem verständlich zu machen, besteht darin, sie zu visualisieren, zu dramatisieren“ (zit. nach [42], S. 24, Übers. d. A.). Es galt, die Wünsche der Zuschauer zu prägen und den Anspruch der Industrie auf kulturelle Hegemonie über die Zukunft zu unterstreichen. Dazu brauchte es Bilder, keine technischen Entwürfe. Das Futurama sollte den Betrachter nicht aufklären, sondern ihn einen Bildraum betreten lassen. *Wie* die Zuschauer hier die Zukunft sahen, war ebenso wichtig wie das, *was* sie sahen. Sie imitierten den „gottgleichen Blick des Piloten“, den auch die modernistischen Planer auf die chaotischen Städte warfen, im Wunsch, diese zu kontrollieren ([25], S. 77f.). Zugleich fiel die Vorstellung des Futuramas in die Zeit der Superhelden (der erste *Superman*-Comic erschien 1938), deren Aufstieg von der Erde als Rettungsallegorie aus der Depression gelesen werden kann.

Wie die automatischen Highways technisch funktionieren sollten, blieb im Gegensatz zur hochentwickelten Bildlandschaft diffus. Dieses Ungleichgewicht ist ein typisches Merkmal aller Techno-Utopien. GM gab nur die Auskunft, nicht genauer beschriebene „Experten“ würden die Autofahrer bei Spurwechseln von Kontrolltürmen aus dirigieren ([9], S. 6, 8). Offenbar sollte der Fahrer das Steuer in der Hand behalten, aber gleichzeitig einem menschlichen Anweiser gehorchen, der seine Befehle per Funk übermittelte. Tatsächlich gibt es laut James Wetmore keine Anhaltspunkte dafür, dass die Bel Geddes'schen Highways über den Modellstatus hinaus entwickelt wurden ([42], S. 5).

Trotzdem entfaltete das Futurama kulturell eine enorme Zugkraft, und dies bis heute. Schon zwei Jahre nach der Show integrierte Science Fiction-Autor Robert A. Heinlein die aus dem Futurama bekannten automatisierten Highways in seinen Roman *Methusalas Children* (1941) ([14], S. 5, 27; [34], S. 27). Die Kontrolle des automatisierten Verkehrs durch Leitzentralen wird darin sehr deutlich.

Außerdem spricht Heinlein hellsichtig ein Thema an, das Ende des 20. Jahrhunderts in zahlreichen Spielfilmen auftauchen wird: Eine Flucht im Auto ist wegen der totalen Überwachung der Straßen unmöglich. Nur das Überfahren eines Zauns bei manueller Steuerung macht es den Protagonisten in Heinleins Roman möglich, von der Automatikspur auf unkontrollierte normale Straßen auszuweichen ([14], S. 27f.).

---

### 3.8 Die Ästhetisierung der Leitdrahtvision

„Why Don't We Have ... CRASH-PROOF HIGHWAYS“, fragte die populärwissenschaftliche Zeitschrift *Mechanix Illustrated* 1953 ([11], S. 58 ff., 184). Der Zweite Weltkrieg hatte den Traum vom automatischen Fahren unterbrochen. Die Automobilindustrie kon-



**Abb. 3.4** Weiterentwickeltes Panoramabild, USA 1953 ([11], S. 58)

zentrierte sich in den 1940er-Jahren auf die Produktion von Militärfahrzeugen. In der Nachkriegszeit blühte die Utopie des fahrerlosen Automobils aber wieder auf. Im Krieg waren neue Technologien entwickelt worden, die nun für zivile Zwecke genutzt werden sollten. Damit wurde die Leitdrahtvision technisch konkreter. Das automatische Fahren sollte mit Magnet-Detektoren realisiert werden, wie sie im Zweiten Weltkrieg zur Detektion von Landminen benutzt worden waren. Radartechnik – auch dies eine militärische Innovation – sollte den Abstand zum vorausfahrenden Wagen regulieren.

Mit dem aus der Vogelperspektive gezeichneten Autobahnpanorama ähnelt die den Artikel begleitende Illustration (s. Abb. 3.4) in verblüffender Weise der bereits besprochenen Zeichnung von 1938. Der Augenpunkt ist nun allerdings abgesenkt, als würde der Blick des Betrachters von einem dicht neben der Straße stehenden Gebäude fallen. Das Bild suggeriert damit, dass die Realisierung des automatischen Fahrens näher gerückt ist. Auch die Fahrzeuge sind nun deutlich detaillierter, das Karosseriedesign etwas futuristischer gezeichnet als in der Zeichnung von 1938.

Das Bild zeigt, dass sich das automatische Fahren in einer Übergangsphase zwischen alten und neuen Mobilitätskonzepten befindet. Zwar hat der Fahrer das Lenkrad losgelassen und sich zu den Passagieren im Fond gedreht. Die Beifahrerin muss jedoch ihren Arm verrenken, um mit den Freunden auf der Rückbank sprechen zu können. Der Zeichner

konnte es sich offensichtlich noch nicht erlauben, das Steuerrad ganz wegzulassen und die Vordersitze zu drehen. Außerdem wird hervorgehoben, dass der Fahrer das System zum Ausfahren aus der Magnetspur manuell übersteuern könne. Für ein vollautomatisches Fahrzeug war das Publikum offensichtlich noch nicht bereit.

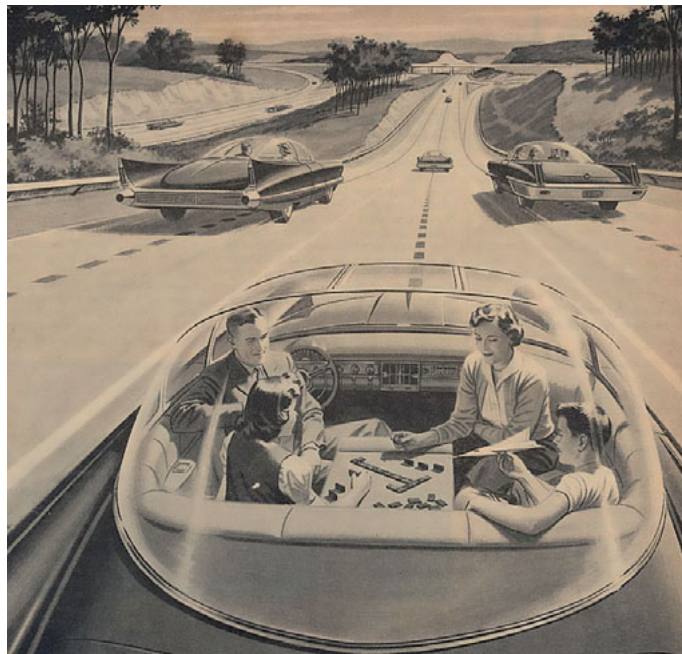
### 3.9 Die Inszenierung der Familie im selbst steuernden Fahrzeug

Americas Independent Electric Light and Power Companies schalteten 1956 im LIFE-Magazine eine Anzeige (s. Abb. 3.5), die bis heute zu den detailliertesten und ästhetisier-  
testen Darstellungen des autonomen Fahrens gehört.

Im Vordergrund ist eine große Limousine zu sehen, die auf der Mittelspur eines sich bis zum Horizont erstreckenden Autobahnbandes dahinrollt. Neben der Zentralperspektive ist die weitere Absenkung des Augenpunktes von großer Bedeutung. Während der Blick in den oben besprochenen Illustrationen aus großer Höhe und Entfernung geworfen wurde, befindet sich der Betrachter nun dicht hinter dem Wagen, was diese Vision in dramatischer Weise real erscheinen lässt.

Bedeutsam ist das große Glasdach, das mehr als die Hälfte des Bildes ausfüllt. Es lenkt den Blick in den Innenraum des Autos. Eine vierköpfige Familie sitzt um einen Tisch herum, als wäre das Auto ein Ersatzwohnzimmer. Alle Familienmitglieder werden den zeitgenössischen gesellschaftlichen Konventionen gemäß dargestellt. Der Vater besetzt den Fahrersitz, auch wenn er sich vom Lenkrad abgewandt hat. Mutter und Tochter spielen

**Abb. 3.5** Detaillierte Version des Panoramas [1]



Domino, während der Sohn sein Modellflugzeug betrachtet. Angegurtet scheint aber niemand zu sein, während das Auto einer gestrichelten Linie auf der kaum befahrenen Strecke folgt.

Dieses Motiv zeigt, dass Bilder automatischer Fahrzeuge in erster Linie eine ideale Oberfläche für die Inszenierung der harmonischen Kleinfamilie waren. So definierte die populäre Frauenzeitschrift *McCalls* die Idealfamilie 1954 über das gemeinschaftliche Beisammensein und das Teilen gemeinsamer Erfahrungen ([24], S. 180). Diese *family togetherness* entwickelte sich schnell zu einem nationalen Ideal. Die 1950er-Jahre können als „Goldenes Zeitalter“ der Familie bezeichnet werden, was sich vor allem am frühen Heiratsalter beider Geschlechter und der geringen Scheidungsrate festmachen lässt und als Reaktion auf die Zeit des Krieges und der Depression interpretiert werden kann: Die Familie bildete demnach einen Gegenpol zu den zunehmend anonymisierten Arbeitsumgebungen, unter denen die persönlichen Beziehungen litten ([24], S. 177 ff.). Die Anzeige zog ihre Attraktivität aus diesen sozialhistorischen Bedingungen, indem sie ein utopisches Gegenbild zur Arbeitswelt aufzeigte. Tatsächlich lautet bis in die Gegenwart eines der wichtigsten Versprechen des autonomen Fahrens, die mit dem Steuern verbrachte Zeit in gemeinsam mit der Familie verbrachte Freizeit zu verwandeln.

---

### 3.10 Das Interstate-System und der Traum vom Magic Highway

Ein Jahrzehnt nach dem Zweiten Weltkrieg, mit dem Ende des Koreakrieges, durchliefen die USA eine Zeit dramatischer Veränderungen. Die Massenkongressgesellschaft begann sich voll zu entfalten. Die Expansion des Automobilismus, schon seit den 1920er-Jahren unverzichtbarer Bestandteil des amerikanischen Lebensstils, führte nun zu einer beschleunigten Transformation des Raumes.

Bedeutsam war vor allem der Bau des überregionalen Interstate Highway Systems 1956. Walt Disneys Fernsehfilm *Magic Highway U.S.A.* (1958) von Ward Kimball ordnet dieses gigantische Autobahnprojekt in eine lineare Fortschrittsgeschichte ein. In einer Mischung aus dokumentarischen Archivaufnahmen und fiktionalen Cartoon-Animationen erzählt der Film die Geschichte der amerikanischen Straße ([40]; [38], S. 112 f.). Den negativen Folgen der Massenmotorisierung – Pannen, Unfälle, Staus – wird die Lichtgestalt des *Highway Engineer* entgegengestellt. Er wird die Straßen bauen, die alle Übel heilen werden.

Und dazu gehört das zukünftige automatische Fahren, das wie in der LIFE-Anzeige mit dem konservativen Idealbild der amerikanischen Familie kombiniert wird (*Magic Highway U.S.A.*, ab 39'00“). Dreh- und Angelpunkte sind dabei ein patriarchales Geschlechtermodell, Vollbeschäftigung und Konsum. Eine Zeichentricksequenz zeigt, wie eine Familie in ein futuristisches Auto steigt. Nachdem der Vater das Ziel auf einem Mischpult eingegeben hat, hält er per Bildtelefon eine Geschäftskonferenz ab und wird anschließend im Büro abgesetzt. Mutter und Sohn fahren ins Shoppingcenter.

Das Versprechen des automatischen Fahrens spielte auf die langen Autofahrten von den Vorstädten (*Suburbs*) in die urbanen Zentren an. Von den 13 Millionen Häusern, die von



1948 bis 1958 in den USA gebaut wurden, entstanden 85 Prozent in den Vorstädten ([24], S. 183). Für die Familien bedeutete dies meist genau das Gegenteil von *family togetherness*: Durch die Notwendigkeit, zur Arbeit zu pendeln, hatten viele Väter kaum noch Zeit, sich um ihre Familien zu kümmern ([24], S. 184). Die Ehefrauen fuhren die Kinder im Auto zur Schule, zum Musikunterricht, zum Arzt. Ihnen fehlten soziale Kontakte, ihr Leben vollzog sich in Isolation und Langeweile. Insofern zeigt der Film ein verfälschendes Bild der Arbeitsteilung zwischen den Geschlechtern, da die Reproduktionsarbeit ausgeblendet wird.

*Magic Highway U.S.A.* endet damit, dass ein automatisches Fahrzeug auf einer zentralperspektivisch angelegten Autobahn dem glutroten Sonnenuntergang entgegenfährt. Damit begegnen wir erneut der utopischen Ästhetik, die sich seit den 1930er-Jahren durch die populäre Kultur zieht. Walt Disney kommentiert diese Einstellung mit den Worten, die Straße verbinde alle Nationen, sie Sorge für „ein besseres Verständnis zwischen den Völkern der Welt“ (*Magic Highway U.S.A.*, 47°05“ – 47°25“, Übers. d. A.). Das automatische Fahren führe wie ein „magischer Teppich zu neuen Hoffnungen, neuen Träumen“, hin zu einem besseren Leben in der Zukunft. Selten wird deutlicher, dass Zukunftstechnologien Teil eines gesellschaftlichen Heilsversprechens sind.

---

### 3.11 Die technische Realisierung der Leitdrahtvision und ihre bildliche Vermittlung

Bisher wurde gezeigt, wie Literatur, Film und Druckmedien das fahrerlose Auto seit den 1930er-Jahren als Teil utopischer Traumlandschaften zeigten. In den 1950er-Jahren bekam dieses literarische und bildliche Technoimaginäre eine neue Dynamik, da in der Automobilindustrie Technologien entwickelt wurden, die den automatischen Verkehr möglich machen sollten.

1953 testete GM gemeinsam mit dem Elektronikhersteller Radio Company of America (RCA) zunächst ein Miniaturmodell der automatischen Straße ([42], S. 6). Das autonome Fahren wurde dann 1956 mithilfe des Konzeptcars Firebird II im Rahmen der reisenden Werbeshow „Motorama“ popularisiert. So zeigt der Begleitfilm *Key to the Future* von Michael Kidd eine im Stau stehende Familie, die singend von einer Reise in einem Firebird II träumt, der sie so viel komfortabler voranbringen würde. Von einem Kontrollturm aus lenkt ein Uniformierter den Wagen in eine automatische Expressspur. Nun folgt der Wagen dem Leitkabel, und der Vater kann das aus Flugzeugen bekannte Steuerhorn (Yoke) ins Armaturenbrett schieben. Technisch funktionierte das System zu diesem Zeitpunkt allerdings noch nicht ([42], S. 7).

Am 14. Februar 1958 absolvierte das erste *automatically guided automobile* im Technical Center von GM in Warren (Michigan) eine Teststrecke von einer Meile ([10]). Die Ingenieure hatten im Frontbereich eines 1958er Chevrolet zwei elektronische Fühler angebracht, die einem in der Straße verlegten Kabel folgten und das Steuerrad danach ausrichteten ([20], S. 76). GM stützte sich dabei auf Forschungen des Fernsehponiers Vladimir Zworykin (1888–1982).

**Abb. 3.6** Automatisches Fahren auf einer GM-Teststrecke 1958 ([20], S. 75)



Populärwissenschaftliche Zeitschriften griffen diese Versuche mit einer pluralisierten Bildstrategie auf, deren Rhetorik sich deutlich von den techno-utopischen Zeichnungen absetzte. So berichtete *Popular Science* 1958 von einer Versuchsfahrt auf der GM-Teststrecke ([20], S. 75 ff., 227). Das erste Foto zeigt eine junge Frau, die lachend das Steuer eines automatischen Wagens loslässt und ihre Hände wie der „neue Mensch“ gen Himmel hebt (s. Abb. 3.6).

Durch die Verwendung dieses ikonischen Motivs, das Sperrys freihändige Präsentation des Autopiloten im Juni 1914 zitiert und bis heute immer wieder im Kontext fahrerloser Automobile auftaucht, lässt sich das Foto eindeutig dem Wunderbaren zuordnen. Die nach oben gestreckten Hände ähneln dem Orantengestus, mit dem der Betende um göttliche Gnade bittet.

Dieser bildliche Bezug zum Numinosen wird durch zwei dem Profanen zugehörige Fotografien geerdet: Sie zeigen erstens Bauarbeiter, die ein Führungskabel in einer Straße verlegen, zweitens das Bild eines Steuerungscomputers. Die Fotografien sollen beglaubigen, dass selbst gesteuerte Autos real existieren, und setzen sich damit von der utopischen Bildästhetik ab.

Im selben Jahr (1958) stellte GM die Studie Firebird III vor, die kein Lenkrad mehr besaß. In der Mittelkonsole befand sich ein Joystick (*Unicontrol*), der alle Fahrfunktionen – Beschleunigen, Bremsen, Lenken – vereinte. Die Leitkabelvision wurde unverändert übernommen.

### 3.12 Die Cruise Control als Nebenprodukt der Technik-Utopie

Zu den utopischen Visionen, die literarisch, zeichnerisch und filmisch imaginiert wurden, und den technischen Versuchssystemen, die grafisch und fotografisch in Szene gesetzt wurden, kamen Mitte der 1950er-Jahre konkrete Anwendungen hinzu.

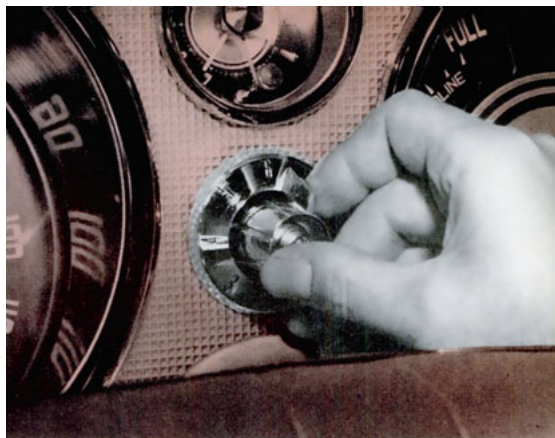
*Popular Science* berichtete 1954 über ein „wohlerzogenes“ Gaspedal, den von Ralph Teetor (1890–1982) entwickelten *Speed-o-Stat*. Dieser automatische Geschwindigkeitshalter und -begrenzer erfreute sich unter den Namen *Tempomat* oder *Cruise Control* bald großer Beliebtheit. Die Zeitschrift präsentierte das System als Meilenstein auf dem Weg zum automatischen Fahren und ordnete es damit in eine größere Fortschrittsbewegung ein ([35], S. 166 ff., 264; [42], S. 34). Tatsächlich verlief diese Bewegung aber umgekehrt: Mit der Entwicklung des Tempomats koppelte sich das in reduzierter und individualisierter Form automatisch fahrende Auto von der Großvision automatischer Autobahnen ab. Damit bildete der Tempomat ein Modell für die Fahrerassistenzsysteme, die das automatische Fahren heute bereits nahezu verwirklichen.

In einem *Popular Science*-Artikel von 1958 heißt es, Chrysler habe ein neues *supergadget* entwickelt, einen „Auto-Piloten“ für 86 Dollar Aufpreis ([36], S. 105 ff., 248, 250). Vom automatischen Verkehr ist nun keine Rede mehr, die utopische Vision schrumpft und kondensiert in einer Ware, die sofort verfügbar ist.

Diese neue Logik der Unmittelbarkeit manifestiert sich im begleitenden Foto (s. Abb. 3.7), das einen verchromten Drehknopf zeigt, der neben dem Tachometer am Armaturenbrett angebracht ist und der Geschwindigkeitseinstellung dient. Zu sehen ist außerdem eine Hand: Daumen und Zeigefinger sind dabei, den Schalter zu drehen.

Diese Nahaufnahme steht am Ende einer langen bildlichen Annäherungsgeschichte an das technische Objekt, die mit den fernen Landschaftspanoramen begann. Damit lassen sich historisch aufeinander folgende Bildstufen identifizieren, die vom Abstrakten zum Konkreten, von der Zeichnung zum Foto, von der Außenaufnahme zum Innenraum, von der Gesamtschau zum Detail, vom Kollektiv zum Individuum verlaufen.

**Abb. 3.7** Einstellrad für den Auto-piloten, Chrysler 1958 ([36], S. 105)



### 3.13 Die unheimliche Verlebendigung der Maschine

Während Presse-, Werbe-, und Filmbilder in den 1950er-Jahren noch ganz dem Wunderbaren dieser Vision verpflichtet sind und dominante gesellschaftliche Wunschbilder in Szene setzen, treibt die Literatur die Frage um, wie stark unsere zukünftigen Autos dem Menschen ähneln werden. Sie warnt vor der Überhöhung zukünftiger Technologien und gibt unbewussten Ängsten einen Raum.

Isaac Asimovs Kurzgeschichte *Sally* (1953) wurde im selben Jahr veröffentlicht wie der oben besprochene *Popular Science*-Artikel. Asimov stellt uns vermenschlichte „Automobile“ vor, deren positronische Motoren es erlauben, dass „nie ein menschliches Wesen hinter ihrem Lenkrad“ sitzen muss ([2], S. 23). Man „gibt den Bestimmungsort an, und der Wagen findet seinen Weg.“ ([2], S. 25). Zunächst sei das autonome Fahren nur schwer durchzusetzen gewesen, habe dann aber alle Unfälle abgeschafft und „das Töten“ beendet ([2], S. 25).

Die besondere Qualität der Geschichte besteht darin, dass Asimov den *gesteigerten* Anthropomorphismus aufzeigt, der mit dieser Vision einhergeht. Die „Automatics“ sind stark verlebendigt, sie werden als „zutraulich und herzlich“ beschrieben ([2], S. 27). Sie „können miteinander sprechen“ ([2], S. 45). Ihre Gefühle könne man am Motorengeräusch hören ([2], S. 43). Besonders die Cabriolets seien „sehr eitel“ ([2], S. 28). Die Automobile können auch auf „Handbetrieb“ umgeschaltet werden ([2], S. 31), man dürfe den Motor jedoch nicht abschalten, da dies dem Wagen Schmerzen bereite ([2], S. 32).

Dieser Anthropomorphismus schlägt dann wie in Kellers Kurzgeschichte von 1935 plötzlich ins Unheimliche und Bedrohliche um. Die Autos entwickeln einen eigenen Willen, sie öffnen ihre Türen nicht mehr ([2], S. 31), rollen auf einen Gegner zu ([2], S. 37) und beginnen schließlich zu töten: „Sie fanden Reifenspuren an seinen Armen und Beinen“ ([2], S. 44). Dieses Muster finden wir später u. a. in dem auf einem Roman von Stephen King basierenden Film *Christine* (1981) wieder.

---

### 3.14 Das fahrerlose Automobil im Film

Ende der 1960er -Jahre ist eine Verschiebung im Bereich der Bildgeschichte selbstfahrender Autos zu beobachten. Hatten die populärwissenschaftlichen Zeitschriften bisher die Rolle eines Leitmediums inne, das mit utopischen Bildkonzeptionen für Aufsehen sorgte, so übernahm nun das Kino diese Rolle. Damit wurde das fahrerlose Automobil endgültig ein wichtiges Element der Unterhaltungsindustrie, wie James Wetmore bestätigt ([42], S. 26).

Die kinematografischen Repräsentationen des autonomen Fahrens überschreiten in der Intensität ihrer Bildsprache deutlich den Horizont der Druckmedien. Ihre Bildwelten sind nicht nur Indikatoren gesellschaftlicher Hoffnungen, sondern vor allem bestimmter Ängste. Das aus der Literatur bekannte Muster aus Wunderbarem und Unheimlichem wird weiterentwickelt. Damit ermöglicht der Film Einblicke in einen Teil des kollektiven Imaginären,

in unbewusste Faktoren, die entscheidend zur Akzeptanz oder zur Ablehnung neuer Technologien beitragen. Außerdem zeigt sich in ihnen der Wandel in der öffentlichen Wahrnehmung selbstfahrender Automobile. Besonders interessant ist die Bewertung verschiedener Mensch-Maschine-Schnittstellen.

---

### 3.15 Vom freundlichen Helfer zur Killermaschine

Das selbstfahrende Automobil tritt erstmals Ende der 1960er-Jahre im Spielfilm auf: Als freundlicher, wenn auch eigensinniger Helfer begeistert *Herbie, The Love Bug* (1968) von Robert Stevenson in Disneys Komödie das Publikum. Der kleine anthropomorphe Rennkäfer hat ein Eigenleben: Er bewegt sich von selbst, verliebt sich in ein anderes Auto, will aus Eifersucht Selbstmord begehen, torkelt betrunken, zittert vor Wut, fiept wie ein Hund, hat Fieber. Da Herbie nicht sprechen kann, werden seine Gefühle über die Kommentare seines Mechanikers veranschaulicht, der ihn zu verstehen scheint. Das selbstfahrende Auto wird als verlebendigtes, maschinales Ebenbild des Menschen gezeigt und dient als Metapher für die merkwürdige, intensive, intime Beziehung des Menschen zum Automobil.

*Herbie* fällt in die Kategorie des „rein Fantastischen“, wie sie Tzvetan Todorov definiert hat [39], denn der Film liefert nie eine mechanische Erklärung für das Verhalten des Wagens. Noch ist das fahrerlose Automobil wie in Illings Roman von 1930 ganz dem Wunderbaren zuzurechnen und hat nichts Unheimliches an sich.

Bald darauf ändert sich das grundlegend: Zwei Jahre vor der Energiekrise 1973 jagt ein riesiger Tanklastwagen in Steven Spielbergs erstem Spielfilm *Duell* einen unscheinbaren Handelsvertreter durch die Berge der kalifornischen Wüste. Infernalisches dröhnt die Trucker-Fanfare dem Opfer im Nacken, grollend verschluckt der Motorenlärm das Dudeln des Radios. Der Mensch ist hier hilflos der Maschine ausgeliefert. Jeder Fluchtversuch scheitert. Zwar wird der Lastwagen von einem Menschen gesteuert, wir bekommen den Fahrer aber nie zu Gesicht. So wird die Maschine mit ihren starren Scheinwerferaugen zum eigentlichen Jäger.

Mit *Herbie* und *Duell* sind die zwei Archetypen fahrerloser Automobile geschaffen, die in den 1970er-Jahren dann ausgeschmückt werden. Herbie bekommt bis 1980 drei Fortsetzungen. Die deutsch-schweizerische B-Film-Serie *Dudu* (1971–1978) inszeniert in *Ein Käfer auf Extratour* (1973) ein Fahrzeug mit künstlicher Intelligenz, das angeblich US-Produzent Glen A. Larson zu der Serie *Knight Rider* inspiriert haben soll, auf die wir später noch zu sprechen kommen.

Parallel dazu beutet der Horrorfilm das Bedrohungspotenzial des fahrerlosen Autos aus. *The Car* (1977) treibt Spielbergs *Duell* weiter. Eine diabolische schwarze Limousine terrorisiert die Einwohner einer Kleinstadt. Mit verdunkelten Scheiben, eng stehenden, stechenden Scheinwerfern, verchromten Stoßstangen in der Form eines Rammbocks und dem Motorengebrüll eines Raubtieres wird das fahrerlose Auto zu einer Personifizierung des Bösen.

Mit *Christine* (1983) erreicht das sich selbst steuernde Auto dann den Anti-Herbie-Zenit des Horrorfilms: John Carpenters Verfilmung von Stephen Kings Roman beschreibt, wie

das lebendig gewordene Auto sich seines Fahrers entledigt: Das sich von selbst einschaltende Radio weist von Anfang an darauf hin, dass dieser Plymouth seinen eigenen Willen hat. Das Radio ist nicht nur Empfänger, sondern vor allem subtiler Sender, es ist Stimme und Seele des fahrerlosen Autos. Im Gegensatz zu *The Car* hat Christine jedoch einen Besitzer, den pubertierenden Arnie, der sich durch sie verwandelt, bald geradezu sexuell von ihr besessen ist. Tagsüber steuert er das Auto, nachts geht Christine auf Jagd, um zu töten. Dann verdunkeln sich ihre Scheiben wie bei dem Lincoln in *The Car*. Christine ist unverletzlich wie ein Zombie, denn sie kann sich auch nach dem schlimmsten Unfall selbst heilen. Der besondere Reiz des Filmes besteht darin, dass es bis zum Schluss unklar bleibt, ob es nicht doch Arnie ist, der Christine steuert.

Die genannten Filme zeigen eine Verselbstständigung des Automobils, die ihr Pendant in der Realität fand. Die negativen Folgen der Massenmotorisierung – eine hohe Anzahl von Verkehrstoten, immer längere Staus und erhebliche Smogbelastungen – wurden in den 1970er-Jahren voll sichtbar. So führte die Ölkrise 1973 zu strengeren Emissionsbestimmungen und die Ära der *Musclecars* gehörte bald der Vergangenheit an. Sowohl in den USA als auch in Europa symbolisiert diese Dekade das Ende des Goldenen Zeitalters des Automobils.

Fahrerlose Autos boten sich dem Kino geradezu an, um diese Entwicklung allegorisch ins Bild zu setzen.

---

### 3.16 Das Aufkommen der Mikroelektronik und die Abkehr von der Leitkabelkonzeption

Während im Kino das Unheimliche der Selbstbewegung beschworen wurde, begann die industrielle Forschung sich vom Konzept automatischer Highways zu entfernen. Die Lücke zwischen technischer und ökonomischer Machbarkeit sei zu groß gewesen, erklärt einer der beteiligten Ingenieure heute (vgl. [42], S. 10). Zudem musste sich die Automobilindustrie auf strengere Umweltauflagen und Sicherheitsanforderungen einstellen. Dies erforderte umfangreiche Investitionen.

Der Trend ging hin zur Forschung an autonomen Einzelfahrzeugen, die nicht auf eine Infrastruktur wie Leitkabel angewiesen sind. Vor allem Japan und die USA machten große Fortschritte bei dem Versuch, dem Auto das Sehen beizubringen: Das Team von Sadayuki Tsugawa vom Mechanical Engineering Laboratory im japanischen Tsukuba stellte 1977 das erste autonome Fahrzeug vor, das über zwei Kameras Bilder der Straße aufnehmen und verarbeiten konnte. Hans Moravec vom Artificial Intelligence Lab der US-amerikanischen Stanford University forschte von 1973 bis 1981 an Roboter-Navigation und nutzte dafür das *Stanford Cart*, ein schon 1960 konstruiertes Experimentalfahrzeug mit vier Fahrradreifen, das es im Oktober 1979 schaffte, sich mithilfe einer Fernsehkamera fünf Stunden lang ohne menschlichen Eingriff durch einen Raum mit Hindernissen zu bewegen.

Das Aufkommen der Mikroelektronik führte außerdem zu einer zunehmenden Elektronifizierung der Fahrzeugtechnik (Einspritzung, Zündung) bis hin zur Einführung der ersten

Bordcomputer (Check Control) im 7er BMW (E23). Mit der Vorstellung des ABS im Jahr 1978 begann die Ära aktiver Fahrerassistenzsysteme, die direkt in das Fahrgeschehen eingreifen.

### 3.17 Knight Rider und die Bordelektronik

Diese technischen Entwicklungen beeinflussten auch die Kulturproduktion. Das Kino kehrte der animistischen Diabolisierung des fahrerlosen Autos den Rücken und begann sich für die Bordelektronik zu interessieren.

Ein sprechendes Auto mit dem Namen KITT (Knight Industries Two Thousand) wurde zum Hauptdarsteller der Fernsehserie *Knight Rider* (1982–1986). Der schwarze Pontiac Firebird Trans Am mit der roten Lichterkette im Kühlergrill konnte sowohl manuell gesteuert werden (Norm-Modus) als auch automatisch fahren (Auto-Modus). Der Fahrerroboter unterstützte den ehemaligen Polizisten Michael Knight bei der Verbrecherjagd.

KITT ist also ein Vollautomat mit Verfügbarkeitsfahrer (s. Kap. 2). Ein Teil seiner Schaltkreise sei an der Stanford-University entwickelt worden, berichtet KITT in Anspielung auf die Entwicklung des fahrerlosen Stanford Cart (*Knight Rider*, Season one, Episode Just my bill – 24:49).

*Knight Rider* bringt die anthropomorphen Dimensionen der *Herbie*-Reihe auf den Stand der Informationsgesellschaft. Im Mittelpunkt der Serie steht der Dialog, die Kommunikation zwischen Mensch und Maschine. Michael Knight kann KITT über seine Armbanduhr (ComLink) herbeirufen.<sup>3</sup> Diese Bilder träumen nicht nur vom autonomen Fahren, sondern von einem Auto, mit dem man sprechen kann, einem Auto, das antwortet. Michael nennt KITT immer wieder *pal* (eng.) – Kumpel. Die Maschine ist ein Partner des Menschen: Auch bei manueller Steuerung – mit einem Gullwing Lenkrad – gibt sie Ratschläge. Die Sprache als Mensch-Maschine-Schnittstelle funktioniert hier reibungslos, im Gegensatz zu ihrer Problematisierung im Film der 1990er-Jahre.

Auch *Knight Rider* bespielt die historisch bekannte Achse aus Wunderbarem und Unheimlichem. Im Rückgriff auf den Bildervorrat des Horrorfilms der 1970er-Jahre liefert sich KITT ein Duell mit seinem böartigen automobilen Ebenbild KARR, einem Fahrzeug, das auf Selbsterhaltung programmiert ist.

Aber auch in dem normalerweise nicht eigenständig agierenden KITT lauert das Potenzial einer Rebellion gegen den Fahrer. Erstens kann er ihn in Ausnahmefällen überstimmen, etwa wenn dieser sich durch sein Fahrverhalten selbst gefährdet: „Ich kann nicht zulassen, dass Sie Ihr Leben in Gefahr bringen. Ich übernehme die Kontrolle.“ (*Knight Rider*, Season one, Episode Trust doesn't trust, 41:53). Hier zeigt sich, dass der um Autonomie kämpfende Computer HAL 9000 aus Stanley Kubricks Film *2001: Odyssee im Weltraum* (1968) der Konzeption von KITT als Vorbild diente ([15], S. 2).

<sup>3</sup> *Knight Rider* soll von einem computerunterstützten Fahrzeug der Serie *B.J. and the Bear* (1979), Episode *Cains Cruiser*, inspiriert worden sein ([15], S. 1).

Zweitens wird auch die Möglichkeit der Umprogrammierung des Fahrzeugs durch Dritte angesprochen, was dann zu einer Bedrohung für seinen Besitzer wird. Diese Variante des Kontrollverlusts taucht auch in den aktuellen Debatten um mögliche Hackerangriffe auf autonome Fahrzeuge auf.

---

### 3.18 Autonome Fahrzeuge im Science Fiction-Film

Mit dem Jahr 1990 beginnt eine 15-jährige Hochkonjunktur autonomer Fahrzeuge im Science Fiction-Film. Das Kino zeigt in ambivalenten Dystopien, wie der Mensch sich die schöne neue Welt der automatischen Fahrzeuge aneignet oder aus ihr vertrieben wird.

Im Konflikt zwischen Mensch und Maschine lautet die zentrale Frage: Wer steuert? Die noch aus *Knight Rider* bekannte Möglichkeit, manuell das Steuer zu übernehmen, entfällt nun in manchen Filmen. Vor allem Fluchtsituationen werden zum Testfall für den Freiheitsgrad des automatischen Automobils. Zudem wird die Fehleranfälligkeit der Mensch-Maschine-Schnittstellen angesprochen. Hervorzuheben ist, dass die meisten Filme dabei weniger die Forschung am autonomen Fahren reflektieren, sondern die Entwicklung der aktiven Assistenzsysteme. An dieser Stelle seien nur drei Meilensteine genannt: Seit 1995 ist die Electronic Stability Control (ESP) verfügbar, die ein Schleudern des Fahrzeugs verhindert. Mit der 1998 von Mercedes vorgestellten DISTRONIC wurde halbautomatisches Fahren möglich. Der niederländische Hersteller TomTom brachte 2004 das erste mobile Navigationsgerät auf den Markt. Für die Popularisierung maschinenunterstützten Fahrens war diese Entwicklung von entscheidender Bedeutung, da der Fahrer sich nun daran zu gewöhnen begann, den Lenkanweisungen eines Computers zu gehorchen.

---

### 3.19 Das Ende des Fluchtwagens im Vollautomaten ohne Interface

Im Science-Fiction-Film lassen sich zwei Ausprägungen selbstfahrender Automobile unterscheiden. Erstens gibt es eine totalitäre Version, die vollautonome Fahrzeuge ohne manuelles Interface zeigt.

Der Film *Total Recall* (1990) von Paul Verhoeven inszeniert erstmals die Krise des Fluchtwagens durch das automatische Auto der Zukunft. Während die Verfolger sich in einem manuell gesteuerten Wagen nähern, versucht der von Arnold Schwarzenegger gespielte Arbeiter Douglas Quaid, in einem automatischen Taxi (Johnny Cab) zu flüchten. Den Befehl, sofort Gas zu geben, versteht der Android jedoch nicht und fragt nach einer Adresse (*Total Recall*, 00:34:00). Als Mensch-Maschine-Schnittstelle ist die Sprache eher hinderlich, da der Fahrroboter die Komplexität menschlicher Kommunikation nicht simulieren kann. Erst nachdem Quaid den mechanischen Chauffeur aus seiner Verankerung gerissen hat und das Auto mit einem Joystick selbst steuert, gelingt ihm die Flucht.

Die Überwachungsutopie *Minority Report* (2002) von Steven Spielberg zeichnet ein noch wesentlich dystopischeres Bild. Hier gibt es nicht einmal mehr den Ausweg, das



automatische Auto durch Vandalismus unter manuelle Kontrolle zu bringen. Der Film zeigt selbst steuernde Fahrzeuge als Element einer Kontrollgesellschaft, in der Verbrechen verhindert werden können, bevor sie passieren. Als ein Polizist beschuldigt wird, in Zukunft selbst einen Mord zu begehen, versucht er in einem der automatischen Maglev (Magnetic Levitation)-Fahrzeuge zu flüchten. Doch kurz darauf ertönt eine weibliche Stimme: „Security lockdown enabled: Revised destination: Office“ (Minority Report, 00:41:49). Der Wagen wird automatisch auf die entgegengesetzte Spur gelenkt und fährt zurück zum Hauptquartier. Das Auto ist zu einem Vollautomaten (s. Kap. 2) geworden, Behörden mit Sonderrechten können in die Steuerung eingreifen. Der Flüchtige ist identisch mit einem Gefangenen. Für ihn besteht die einzige Lösung darin, das Auto zu verlassen, indem er aus dem Fenster springt.

Diese Sequenz zeigt eine der wesentlichen Vorbehalte gegenüber dem autonomen Fahren. Einer der kulturellen Vorzüge des Automobils lag historisch in der Suggestion einer Identität mit dem Selbst. Hier entgleitet das Vehikel nicht nur der Kontrolle dieses Selbst, es wird regelrecht zur Falle, da es von außen ferngesteuert werden kann. Somit repräsentiert es genau das Gegenteil des anthropologisch dominanten, unbewussten Fluchtwunsches, dessen Einlösung das Automobil historisch versprach.

---

### 3.20 Die Wahl des Steuerungsmodus per Stimme oder Knopfdruck

Eine zweite Gruppe von Filmen zeigt eine „demokratischere“ Version des automatischen Fahrens – über eine Mensch-Maschine-Schnittstelle kann der Fahrer zwischen automatischer und manueller Steuerung wählen.

Im futuristischen Thriller *Demolition Man* (1993) von Marco Brambilla ist das autonome Fahren Teil einer perfekten Welt ohne Gefahren, in der Schimpfwörter, Fleisch, Schokolade, körperlicher Sex, Benzin und scharfes Essen verboten sind. Der Film zeigt einen futuristischen Polizeiwagen, der sich sowohl automatisch als auch manuell steuern lässt. Auf den gesprochenen Befehl „SelfDrive on!“ antwortet das Auto mit einer weiblichen Stimme und das Lenkrad entfaltet sich (*Demolition Man* 12:42).

Wie in *Total Recall* wird auch hier die Interface-Tauglichkeit der Sprache für unzuverlässig befunden. Der Bordcomputer meldet einen Softwarefehler und plötzlich ist das Umschalten in den SelfDrive-Modus nicht mehr möglich. Das Auto rast in eine Kurve und auch der Schrei „Bremsen!“ kann den Unfall nicht vermeiden, da das Fahrzeug nicht reagiert (*Demolition Man*, 01:30:20). Mit dieser Sequenz erinnert das Kino daran, dass mit jeder neuen Technologie auch neue Unfalltypen entstehen.

Zwei weitere Filme betonen, dass uns die Flucht nur gelingen kann, wenn das autonome Fahrzeug auf manuelle Steuerung umgeschaltet werden kann.

*Das fünfte Element* (1997) von Luc Besson handelt von dem Taxifahrer Korben Dallas (Bruce Willis), der in einer völlig automatisierten Wohnung lebt und über ein Flugtaxi verfügt. Wie in vielen Filmen wird auch hier die Automatisierung mit Totalüberwachung gleichgesetzt. Zugleich wird das Haptische des Tastendrucks aber als Garant einer letzten

Freiheitsnische inszeniert: Um einer Polizeikontrolle zu entgehen, deaktiviert Dallas den Automatikmodus seines Taxis (Das fünfte Element, 34:20). Dies geschieht per Knopfdruck und nicht per Stimmbefehl.

Das gesamte Setting des Films *I, Robot* (2004) von Alex Proyas zielt auf die Ambivalenz aus Unheimlichem und Wunderbarem moderner Automaten. Kommissar Spooner (Will Smith) verfügt über einen vollautonomen Audi RSQ, der manuell gesteuert werden kann. Das oben offene Steuerrad mit seitlichen Joysticks ist wie im Firebird II ausfahrbar. Aktiviert wird es per Knopfdruck.

Obwohl das Fahrzeug mit hoher Geschwindigkeit durch einen Tunnel fährt, entschließt sich Spooner plötzlich, das Steuer selbst zu übernehmen. „Manual Driving“ bestätigt der Wagen mit einer weiblichen Stimme (*I, Robot*, 21:23). Seine Beifahrerin fragt entsetzt, ob er wirklich manuell fahren wolle. Kurz darauf gibt es fast einen Unfall. Bei hohen Geschwindigkeiten ist die automatische Steuerung also sicherer als die manuelle. Was Sicherheit bedeutet, hängt aber vom Kontext ab. Um sich vor Angreifern in Sicherheit bringen zu können, muss der Wagen manuell gesteuert werden (*I, Robot*, 50:46). Fluchtfahrzeug und autonomes Fahren widersprechen sich auch hier.

*I, Robot* ist bis heute der letzte Film, der autonomes Fahren zeigt. Dies kann im Zusammenhang mit den Roboterrennen des US-amerikanischen Militärs gesehen werden, die im selben Jahr starteten. Mit dem Ziel, zukünftig ein Drittel aller US-Militärfahrzeuge autonom fahren zu lassen, veranstaltete die Forschungsabteilung DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) 2004 die erste *Grand Challenge*, ein Wüstenrennen autonomer Fahrzeuge. Aus dem zweiten Rennen 2005 ging ein VW Touareg namens Stanley als Sieger hervor. Er war im Artificial Intelligence Laboratory der Stanford University unter Leitung von Sebastian Thrun entwickelt worden, der 2008 die bekannte Flotte autonomer Fahrzeuge bei Google aufbaute.

Damit ist das fahrerlose Auto in der Realität angekommen. Lange Zeit inspirierte die Forschung den Film, nun scheint es umgekehrt zu sein: Der Film dient Forschungsteams als Referenz: So nahm an der *Urban Challenge 2007* ein Fahrzeug mit dem Namen *Knight Rider* (Team University of Central Florida) teil.

---

### 3.21 Warum die Fernsteuerung weniger Angst macht

Kommen wir zum Schluss zur Fernsteuerung zurück, die im Film als die am wenigsten problematische Lösung inszeniert wird. *Batman* (1989) ruft sein Fahrzeug über ein Funkgerät herbei (*Batman* 01:08:55), James Bond steuert seinen Wagen in *Tomorrow never dies* (1997) über ein Touchpad auf einem frühen Smartphone (*Tomorrow never dies*, 51:24, 57:26).

Beide Autos sind nicht wirklich fahrerlos, der Fahrer befindet sich nur außerhalb des Wagens. Es gibt also eine Delokalisierung des Fahrerarbeitsplatzes, die Kontrolle wird aber nicht völlig an die Maschine übergeben. Aus diesem Grund taugen die Autos auch als Fluchtfahrzeuge. Von einem Auto gefahren zu werden, ist offenbar inkompatibel mit dem

Status eines Superhelden. Der körperliche Kontakt mit einem materiellen Objekt zum Steuern – hier der Fernbedienung – garantiert, dass die Handlungsmacht des Fahrer-Subjektes erhalten bleibt.

---

### 3.22 Zusammenfassung und Ausblick

Der Blick in die Bild- und Technikgeschichte des automatischen Fahrens hat gezeigt, dass technische und bildliche Innovationen sich in einem Wechselspiel entwickelt haben. Technische Prototypen, literarische Metaphern und bildliche Imaginationen stießen sich gegenseitig an, entwickelten sich aber nie synchron.

Die Fernsteuerungstechnik brachte das erste fremdgesteuerte Auto auf die Straße. Das erste wirklich selbst gesteuerte Fahrzeug entstand aber als literarische Imagination. Von 1935–1955 geht die Bildgeschichte der Technikgeschichte voran, animiert sie mit utopischen Autobahnpanoramen. Ende der 1960er-Jahre entwickelt sich eine von der Technikentwicklung relativ autonome filmische Bildgeschichte, die dann aber ab den 1980er-Jahren die Elektronifizierung des Fahrens direkt kommentiert. Ab 2005 scheint das autonome Fahren filmisch unattraktiv zu werden, da es an der Schwelle zur Gegenwart steht.

Die kulturelle Logik des selbst steuernden Automobils entfaltet sich über den gesamten Zeitraum hinweg zwischen Wunderbarem und Unheimlichem.

Kommen wir – um einen Ausblick zu wagen – zum Schluss auf den anfangs angesprochenen Widerspruch zwischen einem fahrgesteuerten und einem selbstfahrenden Auto zurück. Der Übergang von einer um den Selbstfahrer zentrierten automobilen Kultur zu einer Kultur des Sich-fahren-Lassens stellt eine große Herausforderung dar. Wie wird aus der *Freude am Fahren* (BMW) die *Freude am Gefahren werden*?

Die Automatisierung des Automobils ist nicht mit der Automatisierung anderer Objekte der Industriekultur des 20. Jahrhunderts vergleichbar. Ein wichtiger Effekt der Automatisierung lag in der Erleichterung körperlich mühsamer Tätigkeiten (Rolltreppe, Fahrstuhl, Waschmaschine). Auch wenn diese technischen Transformationen eine Umstellung der Wahrnehmung erforderten, kehrten sie die Logik der betroffenen Aktivitäten nicht diametral um.

Das Lenken eines Autos ist hingegen nicht nur eine mühevoll, langweilige, anstrengende und gefährliche Tätigkeit. Fahren macht auch Spaß. Gerade Risiken und Gefahren machen historisch wie auch aktuell für viele Autofahrer einen zentralen Reiz des Fahrens aus. Der Übergang zu fahrerlosen Automobilen stellt also einen kulturellen Sprung dar, er macht geradezu eine Neuerfindung des Automobils notwendig. Erinnern wir uns: Etymologisch und historisch setzt sich der Begriff Automobil aus *autos* (gr.) (selbst) und *mobilis* (lat.) (beweglich) zusammen. Auto-Mobil zu sein, bedeutet also selbstbeweglich zu sein. Ob mit diesem Selbst der Fahrer gemeint ist oder das Auto, bleibt dabei grundsätzlich offen. Deshalb ließe sich mit einigem Recht behaupten, dass das Auto mit dem autonomen Fahren erst wirklich automobil wird.

### 3.22.1 Bereitet uns Siri auf Iris vor?

Der Erfolg des autonomen Fahrzeugs der Zukunft hängt von einem Schlüsselement ab, der Mensch-Maschine-Schnittstelle. Um die Jahrtausendwende bewertete das Kino die sprachliche Kommunikation zwischen Mensch und Maschine eher skeptisch. Akustischer Austausch wurde als störanfälliger und offener für Zweideutigkeiten dargestellt als haptische Kontakte.

Die Entfernung des Steuerrades stellt weiterhin ein Tabu dar. Es könnte sich aber zeigen, dass die in einem Smartphone im Jahr 2011 eingeführte Spracherkennungssoftware SIRI der Sprachschnittstelle im Auto den Weg bereitet. Eine kürzlich veröffentlichte Studie [41] machte deutlich, dass autonomen Fahrzeugen ein größeres Vertrauen entgegengebracht wird, wenn sie einen Namen, eine Stimme, ein Geschlecht bekommen. Das Auto bekam den Namen IRIS und eine weibliche Stimme, die den Nutzer über die Funktionsweise des Fahrzeugs informierte.

Einerseits brechen fahrerlose Autos in Bezug auf die Steuerung mit allen historischen Ritualen, andererseits sind sie geradezu prädestiniert, die Anthropomorphisierung des Automobils zu steigern. Schon heute behandeln wir unsere Autos wie lebendige Wesen und finden darin nichts Unheimliches, ließe sich in Analogie zu Sigmund Freuds Bemerkungen zum kindlichen Spiel mit Puppen sagen [8]. Die Verlebendigung muss sich also nicht im Unheimlichen des Kinos erschöpfen, sondern könnte auch mit dem Wunderbaren kompatibel sein. Ein gezähmtes, aber verlebendigtes Fahrzeug könnte sogar etwas von dem Märchenhaften [3] zurückerhalten, das dem Automobil mit der Massenmotorisierung abhanden gekommen ist.

---

## Literatur

1. Americas Independent Electric Light and Power Companies, Anzeige, LIFE Magazine Vol. 40, Nr. 5, 30. Januar 1956, S. 8
2. Asimov, I.: Sally. In: Asimov, I.: Alle Roboter-Geschichten, S. 22–46. Bastei-Lübbe, Köln (2007)
3. Barthes, R.: Œuvres complètes. Tome II, Livres, textes, entretiens 1962–1967. Nouvelle édition revue, corrigée et présentée par Éric Marty. Seuil, Paris (2002)
4. Bel Geddes, N.: Horizons. Little, Brown, and Company, Boston (1932)
5. Bloch, E.: Das Prinzip Hoffnung. Band 2. Suhrkamp, Frankfurt am Main (1959)
6. Ceruzzi, Paul E.: Beyond the Limits, Flight Enters the Computer Age. The MIT Press, Cambridge und London (1989)
7. Espenschied, L.: Discussion of „A History of Some Foundations of Modern Radio-Electronic Technology“. Proceedings of the IRE, 47/47, Juli 1959, S. 1253–1258 (1959)
8. Freud, S.: Das Unheimliche. Texte zur Literatur. Fischer, Berlin (1963)
9. General Motors: Futurama, Broschüre zur Ausstellung, USA (1940)
10. General Motors: „An automatically guided automobile cruised along a one-mile check road at General Motors technical Center today...“ Pressemitteilung, USA (1953)
11. Gibson, G. W.: Why Don't We Have... CRASH-PROOF HIGHWAYS. Mechanix Illustrated, Juni 1953, S. 58–60 und 184 (1953)

12. Green, F.: Radio Control – Marvel of the Future. *Popular Science*, 106/3, S. 88–89 und 171–172 (1925)
13. Hammond, J. H., Purington E.S.: Rebuttal of the Discussion of „A History of Some Foundations of Modern Radio-Electronic Technology“, *Proceedings of the IRE*, Juli 1959, S. 1258–1268 (1959)
14. Heinlein, R. A.: *Methuselah’s Children*. PAN Books, London [1941] (1963)
15. Huth, J. F., Levine, R. F.: *Knight Rider Legacy. The Unofficial Guide to the Knight Rider Universe*. Universe Star, Lincoln (2004)
16. Illing, W.: *Utopolis*. Der Bücherkreis, Berlin (1930)
17. Keller, D. H.: *The Living Machine*. *Wonder Stories*, Mai 1935, S. S. 1465–1511 (1935)
18. Kröger, F.: Fahrerlos und unfallfrei. Eine frühe automobilen Technikutopie und ihre populärkulturelle Bildgeschichte. In: Fraunholz, U., Woschek, A. (Hg.) *Technology Fiction, Technische Visionen und Utopien in der Hochmoderne*, S. 93–114. Transcript, Bielefeld (2012)
19. Lefebvre, H.: *Everyday Life in the Modern World*. Penguin, Harmondsworth [1941] (1968)
20. Mann, M.: *The Car That Drives Itself*. *Popular Science*, 172/5, S. 76 (1958)
21. Marchand, R.: The designers go to the Fair, II. Norman Bel Geddes, The General Motors ‚Futurama‘, and the Visit to the Factory Transformed. In: Doordan, D. P. (Hg.) *Design history. An anthology*. S. 103–121. The MIT Press, Cambridge (1995)
22. McClintock, M.: *Street Traffic Control*. McGraw-Hill Book Company, New York (1925)
23. Meyer-Drawe, K.: Das Auto – ein gepanzertes Selbst. In: Winzen, M., Bilstein, J. (Hg.) *Ich bin mein Auto. Die maschinellen Ebenbilder des Menschen*, S. 102–113. Verlag der Buchhandlung Walther König, Köln (2001)
24. Mintz, S., Kellog, S. (Hg.): *Domestic revolutions. A social history of american family life*. The Free Press, New York (1988)
25. Morshed, A.: The Aesthetics of Ascension in Norman Bel Geddes’s Futurama. *The Journal of the Society of Architectural Historians*, 63/1. S. 74–99 (2004)
26. Murtfeldt, E. W.: Highways of the future. *Popular Science*, 132/5, S. 27–29 und 118–119 (1938)
27. Norton, P. D.: *Fighting Traffic. The Dawn of the Motor Age in the American City*. The MIT Press, Cambridge (2008)
28. o. V.: „Driverless Auto, Guided by Radio, Navigates Street“, *The Washington Herald*, 6. August 1921, S. 5
29. o. V.: „Phantom-Auto“ will tour city, *The Milwaukee Sentinel*, 8. Dezember 1926, S. 4
30. o. V.: „Magic Car to demonstrate Safety“, *The Herald Statesman*, 28. Juli 1936, S. 1
31. o. V.: „Robot“ Car to Thread Way in Traffic Today, *Schenectady Gazette*, 24. Oktober 1936, S. 7
32. o. V.: Science: Radio Auto, in: *TIME*, 10. August 1925
33. o. V.: (Abbildung), *The Daily Ardmoreite*, 12. August 1921, S. 5
34. *Phantastische Bibliothek Wetzlar* (Hg.): *Verkehrssysteme der Zukunft. Studie im Auftrag des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) in der Helmholtz-Gemeinschaft, Institut für Verkehrsforschung (IVF), Wetzlar* (2005)
35. Rowsome Jr., F.: Educated Gas Pedal Keeps the Cops Away. *Popular Science*, 164/1, S. 166–169 und 264 (1954)
36. Rowsome Jr., F.: What It’s Like to Drive an Auto-Pilot Car. *Popular Science*, 172/4, S. 105–107, 248, 250 (1958)
37. Siegel, G.: *Technologies of Accident. Forensic Media, Crash Analysis and the Redefinition of Progress*. Dissertation, University of North Carolina, Chapel Hill (2005)
38. Telotte, J. P.: *The mouse machine. Disney and technology*. University of Illinois Press, Urbana, Chicago (2008)
39. Todorov, T.: *Introduction à la littérature fantastique*. Editions du Seuil, Paris (1970)

40. Van Riper, A. B.: A Nation on Wheels. Films about Cars and Driving, 1948–1970. In: Van Riper, A. B. (Hg.): Learning from Mickey, Donald and Walt. Essays on Disney's Edutainment Films, S. 103–112. Mc Farland, Jefferson (2011)
41. Waytz, A., Heafner, J., Epley, N., The Mind in the Machine. Anthropomorphism Increases Trust in an Autonomous Vehicle. *Journal of Experimental Social Psychology*, 52, S. 113–117 (2014)
42. Wetmore, J. M.: Driving the Dream. The History and Motivations Behind 60 Years of Automated Highway Systems in America, *Automotive History Review* (2003)

## Filmografie

The Safest Place	(1935)	Prod.: Jam Handy
Magic Highway U.S.A.	(1958)	R.: Ward Kimball
Key to the Future	(1956)	R.: Michael Kidd
The Love Bug	(1968)	R.: Robert Stevenson
The Car	(1977)	R.: Elliot Silverstein
Ein Käfer auf Extratour	(1973)	R.: Rudolf Zehetgruber
Duell	(1971)	R.: Steven Spielberg
Knight Rider	(1982–1986)	Prod.: Glen A. Larson
Christine	(1983)	R.: John Carpenter
Batman	(1989)	R.: Tim Burton
Total Recall	(1990)	R.: Paul Verhoeven
Demolition Man	(1993)	R.: Marco Brambilla
Tomorrow never dies	(1997)	R.: Roger Spottiswoode
Das fünfte Element	(1997)	R.: Luc Besson
The 6th Day	(2000)	R.: Roger Spottiswoode
Minority Report	(2002)	R.: Steven Spielberg
I, Robot	(2004)	R.: Alex Proyas

Patrick Lin

## Content

<b>4.1 Why ethics matters</b> .....	70
4.1.1 Beyond crash-avoidance .....	71
4.1.2 Crash-optimization means targeting .....	72
4.1.3 Beyond harm .....	73
<b>4.2 Scenarios that implicate ethics</b> .....	74
4.2.1 The deer .....	74
4.2.2 Self-sacrifice .....	76
4.2.3 Ducking harm .....	77
4.2.4 Trolley problems .....	78
<b>4.3 Next steps</b> .....	80
4.3.1 Broader ethical issues .....	80
4.3.2 Conclusions .....	81
<b>References</b> .....	82

If motor vehicles are to be truly autonomous and able to operate responsibly on our roads, they will need to replicate – or do better than – the human decision-making process. But some decisions are more than just a mechanical application of traffic laws and plotting a safe path. They seem to require a sense of ethics, and this is a notoriously difficult capability to reduce into algorithms for a computer to follow.

This chapter will explain why ethics matters for autonomous road vehicles, looking at the most urgent area of their programming. Nearly all of this work is still in front of the

---

P. Lin (✉)  
California Polytechnic State University, Philosophy Department, USA  
palin@calpoly.edu

industry, which is to say that I will mainly raise the questions here and not presume to have any definitive answers at such an early stage of the technology.

*A brief note about terminology*

I will use “autonomous”, “self driving”, “driverless”, and “robot” interchangeably. These refer primarily to future vehicles that may have the ability to operate without human intervention for extended periods of time and to perform a broad range of actions. I will also use “cars” to refer loosely to all motor vehicles, from a motorcycle to a freight truck; those distinctions do not matter for the discussion here.

---

## 4.1 Why ethics matters

To start, let me offer a simple scenario that illustrates the need for ethics in autonomous cars. Imagine in some distant future, your autonomous car encounters this terrible choice: it must either swerve left and strike an eight-year old girl, or swerve right and strike an 80-year old grandmother [33]. Given the car’s velocity, either victim would surely be killed on impact. If you do not swerve, both victims will be struck and killed; so there is good reason to think that you ought to swerve one way or another. But what would be the ethically correct decision? If you were programming the self-driving car, how would you instruct it to behave if it ever encountered such a case, as rare as it may be?

Striking the grandmother could be the lesser evil, at least to some eyes. The thinking is that the girl still has her entire life in front of her – a first love, a family of her own, a career, and other adventures and happiness – while the grandmother has already had a full life and her fair share of experiences. Further, the little girl is a moral innocent, more so than just about any adult. We might agree that the grandmother has a right to life and as valuable a life as the little girl’s; but nevertheless, there are reasons that seem to weigh in favor of saving the little girl over the grandmother, if an accident is unavoidable. Even the grandmother may insist on her own sacrifice, if she were given the chance to choose.

But either choice is ethically incorrect, at least according to the relevant professional codes of ethics. Among its many pledges, the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), for instance, commits itself and its 430,000+ members “to treat fairly all persons and to not engage in acts of discrimination based on race, religion, gender, disability, age, national origin, sexual orientation, gender identity, or gender expression” [23]. Therefore, to treat individuals differently on the basis of their age, when age is not a relevant factor, seems to be exactly the kind of discrimination the IEEE prohibits [18, 33].

Age does not appear to be a relevant factor in our scenario as it might be in, say, casting a young actor to play a child’s character in a movie. In that movie scenario, it would be appropriate to reject adult actors for the role. Anyway, a reason to discriminate does not necessarily justify that discrimination, since some reasons may be illegitimate. Even if we point to the disparity of life experiences between the old and the young, that difference isn’t automatically an appropriate basis for different treatment.



Discriminating on the basis of age in our crash scenario would seem to be the same evil as discriminating on the basis of race, religion, gender, disability, national origin, and so on, even if we can invent reasons to prefer one such group over another. In Germany – home to many influential automotive companies that are working to develop self-driving technologies – the right to life and human dignity is basic and set forth in the first two articles of the very first chapter in the nation’s constitution [9]. So it is difficult to see how German law could even allow a company to create a product that is capable of making such a horrific and apparently illegal choice. The United States similarly strives to offer equal protection to all persons, such as stipulated in the fourteenth amendment of its constitution.

If we cannot ethically choose a path forward, then what ought to be done? One solution is to refuse to make a swerve decision, allowing both victims to be struck; but this seems much worse than having only one victim die, even if we are prejudiced against her. Anyway, we can force a decision by modifying the scenario: assume that 10 or 100 other pedestrians would die, if the car continued forward; and swerving would again result in only a single death.

Another solution could be to arbitrarily and unpredictably choose a path, without prejudice to either person [34]. But this too seems ethically troubling, in that we are choosing between lives without any deliberation at all – to leave it to chance, when there are potentially some reasons to prefer one over the other, as distasteful and uncomfortable as those reasons may be. This is a dilemma that is not easily solvable and therefore points to a need for ethics in developing autonomous cars.

### 4.1.1 Beyond crash-avoidance

Many readers may object right away that the dilemma above (and others that follow) will never occur with autonomous cars. It may be suggested that future cars need not confront hard ethical choices, that simply stopping the car or handing control back to the human operator is the easy path around ethics. But I will contend here that braking and relinquishing control will not always be enough. Those solutions may be the best we have today, but if automated cars are to ever operate more broadly outside of limited highway environments, they will need more response-options.

Current research already makes this case as a matter of physics [12, 13], but we can also make a case from commonsense. Many ordinary scenarios exist today in which braking is not the best or safest move, whether by human or self-driving car. A wet road or a tailgater, for instance, may make it dangerous to slam the brakes, as opposed to some other action such as steering around the obstacle or simply through it, if it is a small object. Today, the most advanced self-driving cars cannot detect small objects such as squirrels [7]; therefore, they presumably cannot also detect squirrel-sized rocks, potholes, kittens, and other small but consequential hazards can cause equipment failure, such as tire blowouts or sensor errors, or deviations from a safe path.

In these and many other cases, there may not be enough time to hand control back to the driver. Some simulation experiments suggest that human drivers need up to 40 seconds to regain situation awareness, depending on the distracting activity, e. g., reading or napping – far longer than the 1–2 seconds of reaction time required for typical accident scenarios [38, 18]. This means that the car must be responsible for making decisions when it is unreasonable to expect a timely transfer of control back to the human, and again braking might not be the most responsible action.

One possible reply is that, while imperfect, braking could successfully avoid the majority of emergency situations a robot car may find itself in, even if it regrettably makes things worse in a small number of cases. The benefits far outweigh the risks, presumably, and the numbers speak for themselves. Or do they? I will discuss the dangers of morality by math throughout this chapter.

Braking and other responses in the service of crash-avoidance won't be enough, because crash-avoidance is not enough. Some accidents are unavoidable – such as when an animal or pedestrian darts out in front of your moving car – and therefore autonomous cars will need to engage in *crash-optimization* as well. Optimizing crashes means to choose the course of action that will likely lead to the least amount of harm, and this could mean a forced choice between two evils, for instance, choosing to strike either the eight-year old girl or the 80-year old grandmother in my first scenario above.

#### 4.1.2 Crash-optimization means targeting

There may be reasons, by the way, to prefer choosing to run over the eight-year old girl that I have not yet mentioned. If the autonomous car were most interested in protecting its own occupants, then it would make sense to choose a collision with the lightest object possible (the girl). If the choice were between two vehicles, then the car should be programmed to prefer striking a lighter vehicle (such as a Mini Cooper or motorcycle) than a heavier one (such as a sports utility vehicle (SUV) or truck) in an adjacent lane [18, 34].

On the other hand, if the car were charged with protecting other drivers and pedestrians over its own occupants – not an unreasonable imperative – then it should be programmed to prefer a collision with the heavier vehicle than the lighter one. If vehicle-to-vehicle (V2V) and vehicle-to-infrastructure (V2I) communications are rolled out (or V2X to refer to both), or if an autonomous car can identify the specific models of other cars on the road, then it seems to make sense to collide with a safer vehicle (such as a Volvo SUV that has a reputation for safety) over a car not known for crash-safety (such as a Ford Pinto that's prone to exploding upon impact).

This strategy may be both legally and ethically better than the previous one of jealously protecting the car's own occupants. It could minimize lawsuits, because any injury to others would be less severe. Also, because the driver is the one who introduced the risk to society – operating an autonomous vehicle on public roads – the driver may be legally obligated,

or at least morally obligated, to absorb the brunt of any harm, at least when squared off against pedestrians, bicycles, and perhaps lighter vehicles.

The ethical point here, however, is that no matter which strategy is adopted by an original equipment manufacturer (OEM), i. e., auto manufacturer, programming a car to choose a collision with any particular kind of object over another very much resembles a *targeting* algorithm [33]. Somewhat related to the military sense of selecting targets, crash-optimization algorithms may involve the deliberate and systematic discrimination of, say, large vehicles or Volvos to collide into. The owners or operators of these targeted vehicles bear this burden through no fault of their own, other than perhaps that they care about safety or need an SUV to transport a large family.

### 4.1.3 Beyond harm

The problem is starkly highlighted by the following scenario [15, 16, 17, 34]: Again, imagine that an autonomous car is facing an imminent crash, but it could select one of two targets in adjacent lanes to swerve into: either a motorcyclist who is wearing a helmet, or a motorcyclist who is not. It probably doesn't matter much to the safety of the car itself or its occupants whether the motorcyclist is wearing a helmet; the impact of a helmet into a car window doesn't introduce that much more risk that the autonomous car should want to avoid it over anything else. But it matters a lot to the motorcyclist whether s/he is wearing a helmet: the one without a helmet would probably not survive such a collision. Therefore, in this dreadful scenario, it seems reasonable to program a good autonomous car to swerve into the motorcyclist with the helmet.

But how well is justice and public policy served by this crash-optimization design? Motorcyclists who wear helmets are essentially being penalized and discriminated against for their responsible decision to wear a helmet. This may encourage some motorcyclists to not wear helmets, in order to avoid targeting by autonomous cars. Likewise, in the previous scenario, sales may decline for automotive brands known for safety, such as Volvo and Mercedes Benz, insofar as customers want to avoid being the preferred targets of crash-optimization systems.

Some readers may want to argue that the motorcyclist without a helmet ought to be targeted, for instance, because he has acted recklessly and therefore is more deserving of harm. Even if that's the correct design, notice that we are again moving beyond harm in making crash-optimization decisions. We're still talking about justice and other such ethical considerations, and that's the point: it's not just a numbers game.

Programmers in such scenarios, as rare as they may be, would need to design cost-functions – algorithms that assign and calculate the expected costs of various possible options, selecting the one with the lowest costs – that potentially determine who gets to live and who gets to die. And this is fundamentally an ethics problem, one that demands much more care and transparency in reasoning than seems currently offered. Indeed, it is difficult to imagine a weightier and more profoundly serious decision

a programmer would ever have to make. Yet, there is little discussion about this core issue to date.

---

## 4.2 Scenarios that implicate ethics

In addition to the ones posited above, there are many actual and hypothetical scenarios that involve judgments about ethics. I will describe some here to show how ordinary assumptions in ethics can be challenged.

### 4.2.1 The deer

Though difficult to quantify due to inconsistent and under-reporting, experts estimate that more than a million car accidents per year in the US are caused by deer [6, 48]. Many, if not most, drivers have been startled by an unexpected animal on the road, a dangerous situation for both parties. Deconstructing a typical accident, or near-accident, involving an animal illustrates the complexity of the decisions facing the driver [30]. While all this happens within seconds – not enough time for careful deliberations by human drivers – an autonomous car could have the virtue of a (presumably) thoughtful decision-making script to very quickly react in an optimal way. If it is able to account for the many variables, then it ought to, for the most informed decision possible.

First, suppose an object appears on the road directly in front of a car in autonomous mode. Is there time to reasonably hand control back to the human behind the wheel? (Probably not.) If not, is there time to stop the car? Would the car need to brake hard, or would moderate braking be sufficient? The decision to brake depends, again, on road conditions and whether a tailgater (such as a big-rig truck) is behind you, including its speed to determine the severity of a possible rear-end collision.

Second, what is the object? Is it an animal, a person, or something else? If it is an animal, are some animals permissible to run over? It may be safer to continue ahead and strike a squirrel, for instance, than to violently swerve around it and risk losing control of the car. However, larger animals, such as deer and cows, are more likely to cause serious damage to the car and injuries to occupants than a spun-out car. Other animals, still, have special places in our hearts and should be avoided if possible, such as pet dogs and cats.

Third, if the car should get out of the way – either in conjunction with braking or not – should it swerve to the left or to the right? In the US and other nations in which drivers must stay on the right side of the road, turning to the right may mean driving off the road, potentially into a ditch or a tree. Not only could harm to the car and occupants be likely, but it also matters how many occupants are in the car. The decision to drive into an embankment seems different when only one adult driver is in the car, than when several children are inside too.

On the other hand, turning to the left may mean driving into an opposite lane, potentially into a head-on collision with incoming vehicles. If such a collision is unavoidable, then it

matters what kind of vehicle we would crash into (e. g., is it a compact car or SUV?), how heavy incoming traffic is (e. g., would more than one vehicle be involved?), how many persons may be involved (e. g., are there children in the other car?). Of course, here we are assuming perfect sensing and V2X communications that can help answer these questions. If we cannot answer the questions, then we face a possibly large unknown risk, which makes driving into incoming traffic perhaps the worst option available.

Other factors relevant to the decision-points above include: the road-shoulder type (paved, gravel, none, etc.), the condition of the car's tires and brakes, whether the car's occupants are seat-belted, whether the car is transporting dangerous cargo that could spill or explode, proximity to hospital or emergency rescue, damage to property such as houses and buildings, and more. These variables influence the probability of an accident as well as expected harm, both of which are needed in selecting the best course of action.

From this short analysis of a typical crash (or possible crash) with an animal, we can already see a daunting number of factors to account for. Sensing technologies today cannot answer some or many of the questions above, but it is already unclear that braking should be the safest default option – as a proxy for the most ethical option – given these uncertain conditions, all things considered. Automated cars today can already detect whether there is oncoming traffic in the opposite lane. Therefore, it is at least possible that they can be programmed to maneuver slightly into the incoming lane under some conditions, e. g., when there are no incoming cars and when it may be dangerous to slam on the brakes.

Whether or not sensing technologies will improve enough to deliver answers to our questions above, a programmer or OEM would still need to assign costs or weights to various actions and objects as best as they can. Yet these values are not intrinsic to or discoverable by science or engineering. Values are something that we humans must stipulate and ideally agree upon. In constructing algorithms to control an autonomous car, ethics is already implied in the design process. Any decision that involves a tradeoff such as to strike object *x* instead of object *y* requires a value-judgment about the wisdom of the tradeoff, that is, the relative weights of *x* and *y*. And the design process can be made better by recognizing the ethical implications and by engaging the broader community to ensure that those values are represented correctly or at least transparently. Working in a moral bubble is less likely to deliver results that are acceptable to society.

Again, in a real-world accident today, a human driver usually has neither the time nor the information needed to make the most ethical or least harmful decisions. A person who is startled by a small animal on an otherwise uneventful drive may very well react poorly. He might drive into oncoming traffic and kill a family, or oversteer into a ditch and to his own death. Neither of these results, however, is likely to lead to criminal prosecution by themselves, since there was no forethought, malice, negligence, or bad intent in making a forced, split-second reaction. But the programmer and OEM do not operate under the sanctuary of reasonable instincts; they make potentially life-and-death decisions under no truly urgent time-constraint and therefore incur the responsibility of making better decisions than human drivers reacting reflexively in surprise situations.

### 4.2.2 Self-sacrifice

As we can see, real-world accidents can be very complicated. In philosophy and ethics, a familiar method is to simplify the issues through hypothetical scenarios, otherwise known as “thought-experiments.” This is similar to everyday science experiments in which researchers create unusual conditions to isolate and test desired variables, such as sending spiders into outer space to see how micro-gravity affects their ability to spin webs. It is not a good objection to those experiments to say that no spiders exist naturally in space; that misses the point of the experiment.

Likewise, it is no objection to our hypothetical examples that they are outlandish and unlikely to happen in the real world, such as a car that can distinguish an eight-year old from an 80-year old (though with improving biometrics, facial recognition technologies, and linked databases, this doesn’t seem impossible). Our thought-experiments are still useful in drawing out certain ethical intuitions and principles we want to test.

With that understanding, we can devise hypothetical scenarios to see that reasonable ethical principles can lead to controversial results in the context of autonomous driving. Digging into a standard philosophical toolbox for help with ethical dilemmas, one of the first principles we might reach for is consequentialism: that the right thing to do is whatever leads to the best results, especially in quantified terms [44]. As it applies here, consequentialism suggests that we should strive to minimize harm and maximize whatever it is that matters, such as, the number of happy lives.

In this thought-experiment, your future autonomous car is driving you on a narrow road, alongside a cliff. No one and no technology could foresee that a school bus with 28 children would appear around the corner, partially in your lane [29, 36]. Your car calculates that crash is imminent; given the velocities and distance, there is no possible action that can avoid harming you. What should your robot car do?

A good, standard-issue consequentialist would want to optimize results, that is, maximize the number of happy lives and minimize harm. Assuming that all lives in this scenario are more or less equally happy – for instance, there’s no super-happy or super-depressed person, and no very important person who has unusual influence over the welfare of others – they would each count for about the same in our moral calculation. As you like, we may either ignore or account for the issue of whether there is extra value in the life of innocent child who has more years of happiness ahead of her than an average adult; that doesn’t matter much for this scenario.

The robot car’s two main choices seem to be: (1) to slam on the brakes and crash into the bus, risking everyone’s lives, or (2) to drive off the cliff, sparing the lives of everyone on the bus. Performing a quick expected-utility calculation, if the odds of death to each person (including the adult bus driver) in the accident averaged more than one in 30, then colliding into the bus would yield the expected result of more than one death, up to all 30 persons. (Let’s say the actual odds are one in three, which gives an expected result of 10 deaths.) If driving off a cliff meant certain death, or the odds of one in one, then the expected result of that would be exactly one death (your own) and no more. The right consequen-

tialist decision for the robot car – if all we care about is maximizing lives and minimizing deaths – is apparently to drive off the cliff and sacrifice the driver, since it is better that only one person should die rather than more than one, especially 10 or all 30 persons.

This decision would likely be different if, instead of a school bus, your robot car were about to collide with another passenger car carrying only one person. Given the same average odds of death, one in three, the expected number of deaths in a collision would only be 0.67, while the expected number of deaths in driving off a cliff remains at one. In that case, the right consequentialist decision would be to allow the accident to occur, as long as the average odds of death are less than one in two. If, instead of another vehicle, your car were about to collide with a deer, then the decision to stay on the road, despite an ensuing accident, would be even more obvious insofar as we value a deer's life less than a human life.

Back to the school-bus scenario, programming an autonomous car with a consequentialist framework for ethics would seem to imply your sacrifice. But what is most striking about this case might not even be your death or the moral mathematics: if you were in a manually driven car today, driving off the cliff might still be the most ethical choice you could make, so perhaps you would choose certain death anyway, had you the time to consider the options. However, it is one thing for you to willingly make that decision of sacrifice yourself, and quite another matter for a machine to make that decision without your consent or foreknowledge that self-sacrifice was even a possibility. That is, there is an astonishing lack of transparency and therefore consent in such a grave decision, one of the most important that can be made about one's life – perhaps noble if voluntary, but criminal if not.

Thus, reasonable ethical principles – e.g., aiming to save the greatest number of lives – can be stressed in the context of autonomous driving. An operator of an autonomous vehicle, rightly or not, may very well value his own life over that of everyone else's, even that of 29 others; or he may even explicitly reject consequentialism. Even if consequentialism is the best ethical theory and the car's moral calculations are correct, the problem may not be with the ethics but with a lack of discussion about ethics. Industry, therefore, may do well to have such a discussion and set expectations with the public. Users – and news headlines – may likely be more forgiving if it is explained in advance that self-sacrifice may be a justified feature, not a bug.

### 4.2.3 Ducking harm

Other ethical principles can create dilemmas, too. It is generally uncontroversial that, if you can easily avoid harm to yourself, then you should do it. Indeed, it may be morally required that you save yourself when possible, if your life is intrinsically valuable or worth protecting; and it is at least extrinsically valuable if you had a dependent family. Auto manufacturers or OEMs seem to take this principle for granted as well: if an autonomous car can easily avoid a crash, e.g., by braking or swerving, then it should. No ethical problem here – or is there?

In another thought-experiment [15, 18, 33], your robotic car is stopped at an intersection and waits patiently for the children who are crossing in front of you. Your car detects a pickup truck coming up behind you, about to cause a rear-end collision with you. The crash would likely damage your car to some degree and perhaps cause minor injury to you, such as whiplash, but certainly not death. To avoid this harm, your car is programmed to dash out of the way, if it can do so safely. In this case, your car can easily turn right at the intersection and avoid the rear-end collision. It follows this programming, but in doing so, it clears a path for the truck to continue through the intersection, killing a couple children and seriously injuring others.

Was this the correct way to program an autonomous car? In most cases of an impending rear-end collision, probably yes. But in this particular case, the design decision meant saving you from minor injury at the expense of serious injury and death of several children, and this hardly seems to be the right choice. In an important respect, you (or the car) are responsible for their deaths: you (or the car) killed the children by removing an obstruction that prevented harm from falling upon them, just as you would be responsible for a person's death if you removed a shield he was holding in front of a stream of gunfire. And killing innocent people has legal and moral ramifications.

As with the self-sacrifice scenario above, it might be that in the same situation today, in a human-driven car, you would make the same decision to save yourself from injury, if you were to see a fast-approaching vehicle about to slam into you. That is, the result might not change if a human made the on-the-spot decision. But, again, it is one thing to make such a judgment in the panic of the moment, but another less forgivable thing for a programmer – far removed from the scene and a year or more in advance – to create a cost-function that resulted in these deaths. Either the programmer did so deliberately, or she did it unintentionally, unaware that this was a possibility. If the former, then this could be construed as premeditated homicide; and if the latter, gross negligence.

Either way is very bad for the programmer and perhaps an inherent risk in the business, when one attempts to replicate human decision-making in a broad range of dynamic scenarios. Sometimes, an autonomous car may be faced with a “no-win” scenario, putting the programmer in a difficult but all too real position. To mitigate this risk, industry may do well to set expectations not only with users but also with broader society, educating them that they could also become victims even if not operating or in a robot car, and that perhaps this is justified by a greater public or overall good.

#### **4.2.4 Trolley problems**

One of the most iconic thought-experiments in ethics is the trolley problem [4, 8, 11, 47], and this is one that may now occur in the real world, if autonomous vehicles come to be. Indeed, driverless trains are already operating in dozens of cities worldwide and could bring this scene to life [24]. The classical dilemma involves a runaway trolley (or train) that is about to run over and kill five unaware people standing on the tracks. Looking at the scene



from the outside, you find yourself standing next to a switch: if you pull the switch, you can shunt the train to a right-hand set of tracks, thereby saving the five individuals on the track. Unfortunately, there is one person standing on the right-hand set of tracks who would then be killed. What is the right decision?

The “correct” decision continues to be a subject of much debate in philosophy. Both answers seem reasonable and defensible. A consequentialist might justify switching the tracks to save five people, even at the regrettable expense of one. But a non-consequentialist, someone who considers more than just the math or results, might object on the grounds that switching tracks constitutes an act of killing (the one person), while doing nothing is merely allowing someone to die (the five individuals); and that it is morally and legally worse to kill than to let die.

Killing implies that you are directly responsible for a person’s death: had you not done what you did, the person would have lived. Letting die, however, involves much less responsibility on your part, if any, since some causal process was already underway that was not initiated or otherwise controlled by you. The question of whether it is worse to kill than to let die is also subject to debate in philosophy. But let us bracket that for the moment, as a final answer is not necessary for our discussion, only that it is reasonable to believe that proposition.

Adapting the trolley problem to the technology at hand, let us suppose that you are driving an autonomous car in manual mode; you are in control. Either intentionally or not – you could be homicidal or simply inattentive – you are about to run over and kill five pedestrians. Your car’s crash-avoidance system detects the possible accident and activates, forcibly taking control of the car from your hands. To avoid this disaster, it swerves in the only direction it can, let’s say to the right. But on the right is a single pedestrian who is unfortunately killed.

Was this the right decision for your car to make? Again, a consequentialist would say yes: it is better that only one person dies than five. But a non-consequentialist might appeal to a moral distinction between killing and letting die, and this matters to OEMs for liability reasons. If the car does not wrestle control from the human driver, then it (and the OEM) would perhaps not be responsible for the deaths of the five pedestrians while you were driving the car; it is merely letting those victims die. But if the car does take control and make a decision that results in the death of a person, then it (and the OEM) becomes responsible for killing a person.

As with the trolley problem, either choice seems defensible. Results do matter, so it is not ridiculous to think that the car should be programmed to act and save lives, even at the expense of a fewer number of lives. Yet it also seems reasonable to think that killing is worse than letting die, especially in the eyes of the law. What I want to highlight here is not so much the answer but the process of deliberation that points us toward one answer over another. To the extent that there could be many acceptable answers to any given ethical dilemma, how well one answer can be defended is crucial toward supporting that answer over others.

Industry again would do well to set expectations by debating and explaining in advance its reasoning behind key algorithms that could result in life or death. Transparency, or showing one’s math, is an important part of doing ethics, not just the answer itself.

### 4.3 Next steps

Notice that the ethical issues discussed in this paper do not depend on technology errors, poor maintenance, improper servicing, security vulnerabilities, or other failings – and all those will occur too. No complex technology we have created has been infallible. Even industries with money directly at stake have not solved this problem. For instance, bank ATMs continue to make headlines when they hemorrhage cash – tens of thousands of dollars more than the account holder actually has – because of software glitches alone [2, 10], never mind hacking. And just about every computing device we have created has been hacked or is hackable, including neural implants and military systems [3, 28].

These vulnerabilities and errors certainly can cause harm in the context of autonomous cars, and it would be unethically irresponsible to not safeguard against them where we can. Putting these technology issues aside and even assuming that perfect technology is available, there are still many other safety and ethical questions to worry about, such as the programming issues above.

#### 4.3.1 Broader ethical issues

But programming is only one of many areas to reflect upon as society begins to adopt autonomous driving technologies. Assigning legal and moral responsibility for crashes is a popular topic already [1, 14, 20, 22, 49, 51]. Here are a few others, as part of a much longer list of possible questions:

Does it matter to ethics if a car is publicly owned, for instance, a city bus or fire truck? The owner of a robot car may reasonably expect that its property “owes allegiance” to the owner and should value his or her life more than anonymous pedestrians and drivers. But a publicly owned automated vehicle might not have that obligation, and this can change moral calculations. Even for privately owned autonomous vehicles, the occupants arguably should bear more or all of the risk, since they are the ones introducing the machine into public spaces in the first place.

Do robot cars present an existential threat to the insurance industry? Some believe that ultra-safe cars that can avoid most or all accidents will mean that many insurance companies will go bankrupt, since there would be no or very little risk to insure against [40, 52]. But things could go the other way too: We could see *mega*-accidents as cars are networked together and vulnerable to wireless hacking – something like the stock market’s “flash crash” in 2010 [5]. What can the insurance industry do to protect itself while not getting in the way of the technology, which holds immense benefits?

How susceptible would robot cars be to hacking? So far, just about every computing device we have created has been hacked. If authorities and owners (e. g., rental car company) are able to remotely take control of a car – which is reportedly under development for law enforcement in the European Union [50] – this offers an easy path for cyber-carjackers. If under attack, whether a hijacking or ordinary break-in, what should the car do: speed

away, alert the police, remain at the crime scene to preserve evidence, or maybe defend itself?

For a future suite of in-car apps, as well as sensors and persistent GPS/tracking, can we safeguard personal information, or do we resign ourselves to a world with disappearing privacy rights [27]? To the extent that online services bring online advertising, we could see new, insidious advertising schemes that may allow third-party advertisers to have some influence on the autonomous car's route selection, e.g., steering the car past their businesses [32].

What kinds of abuse might we see with autonomous cars? If the cars drive too conservatively, they may become a traffic hazard or trigger road-rage in human drivers with less patience [26, 42]. If the crash-avoidance system of a robot car is generally known, then other drivers may be tempted to "game" it, e.g., by cutting in front of it, knowing that the automated car will slow down or swerve to avoid an accident. If those cars can safely drive us home in a fully-auto mode, that may encourage a culture of more alcohol consumption, since we won't need to worry so much about drunk-driving.

More distant concerns include: How will law-abiding robot cars affect city revenue, which often depends on traffic fines imposed against law-breaking human drivers? Inasmuch as many organ transplants come from car-accident victims, how will society manage a declining and already insufficient supply of donated organs [41]?

Older-model autonomous cars may be unable to communicate with later models or future road infrastructure. How do we get those legacy models – which may be less safe, in addition to incompatible with newer technology – off the roads [45]? Since 2009, Microsoft has been trying to kill off its Windows XP operating system [39], a much less expensive investment than an autonomous car; but many users still refuse to relinquish it, including for critical military systems [37, 46]. This is a great security risk since Microsoft will no longer offer software patches for the operating system.

### 4.3.2 Conclusions

We don't really know what our robot-car future will look like, but we can already see that much work needs to be done. Part of the problem is our lack of imagination. Technology policy expert Peter W. Singer observed, "We are still at the 'horseless carriage' stage of this technology, describing these technologies as what they are not, rather than wrestling with what they truly are" [43].

As it applies here, robots aren't merely replacing human drivers, just as human drivers in the first automobiles weren't simply replacing horses: that would like mistaking electricity as merely a replacement for candles. The impact of automating transportation will change society in radical ways, and technology seems to be accelerating. As Singer puts it, "Yes, Moore's Law is operative, but so is Murphy's Law" [43]. When technology goes wrong – and it will – thinking in advance about ethical design and policies can help guide us responsibility into the unknown.

In future autonomous cars, crash-avoidance features alone won't be enough. An accident may be unavoidable as a matter of physics [12, 13], especially as autonomous cars make their way onto city streets [19, 21, 25], a more dynamic environment than highways. It also could be too dangerous to slam on the brakes, or not enough time to hand control back to the unaware human driver, assuming there's a human in the vehicle at all. Technology errors, misaligned sensors, malicious actors, bad weather, and bad luck can also contribute to imminent collisions. Therefore, robot cars will also need to have crash-optimization strategies that are thoughtful about ethics.

If ethics is ignored and the robotic car behaves badly, a powerful case could be made that auto manufacturers were negligent in the design of their product, and that opens them up to tremendous legal liability, should such an event happen. Today, we see activists campaigning against "killer" military robots that don't yet exist, partly on the grounds that machines should never be empowered to make life-and-death decisions [31, 35]. It's not outside the realm of possibility to think that the same precautionary backlash won't happen to the autonomous car industry, if industry doesn't appear to be taking ethics seriously.

The larger challenge, though, isn't just about thinking through ethical dilemmas. It's also about setting accurate expectations with users and the general public who might find themselves surprised in bad ways by autonomous cars; and expectations matter for market acceptance and adoption. Whatever answer to an ethical dilemma that industry might lean towards will not be satisfying to everyone. Ethics and expectations are challenges common to all automotive manufacturers and tier-one suppliers who want to play in this emerging field, not just particular companies.

Automated cars promise great benefits and unintended effects that are difficult to predict, and the technology is coming either way. Change is inescapable and not necessarily a bad thing in itself. But major disruptions and new harms should be anticipated and avoided where possible. That is the role of ethics in innovation policy: it can pave the way for a better future while enabling beneficial technologies. Without looking at ethics, we are driving with one eye closed.

---

## References

1. Anderson, J., Kalra, N., Stanley, K., Sorensen, P., Samaras, C., Oluwatola, O.: Autonomous vehicle technology: a guide for policymakers. Report by RAND Corporation. [http://www.rand.org/pubs/research\\_reports/RR443-1.html](http://www.rand.org/pubs/research_reports/RR443-1.html) (2014). Accessed 8 July 2014
2. Associated Press. ATM 'glitch' gives \$37,000 to lucky homeless man. Daily Mail. <http://www.dailymail.co.uk/news/article-2596977/ATM-glitch-gives-OVER-37-000-homeless-man-cash-requested-140.html> (2014). Accessed 8 July 2014
3. Baldor, L.: China hacked the Pentagon to get weapons data. Talking Points Memo. <http://talkingpointsmemo.com/news/china-hacked-the-pentagon-to-get-weapons-programs-data> (2013). Accessed 8 July 2014
4. Cathcart, T.: *The Trolley Problem, or Would You Throw the Fat Guy Off the Bridge?* Workman Publishing Company, New York (2013)

5. Commodity Futures Trading Commission and the Securities and Exchange Commission: Findings regarding the market events of May 6, 2010. CFTC and SEC, Washington DC. <http://www.sec.gov/news/studies/2010/marketevents-report.pdf> (2010). Accessed 8 July 2014
6. Curtis, P. and Hedlund, J.: Reducing deer-vehicle crashes. Report funded by the Insurance Institute for Highway Safety. Cornell University, Ithaca. [http://wildlifecontrol.info/pubs/Documents/Deer/Deer-Vehicle\\_factsheet1.pdf](http://wildlifecontrol.info/pubs/Documents/Deer/Deer-Vehicle_factsheet1.pdf) (2005). Accessed 8 July 2014
7. Davies, A.: Avoiding squirrels and other things Google's robot car can't do. *Wired*. <http://www.wired.com/2014/05/google-self-driving-car-can-cant/> (2014). Accessed 8 July 2014
8. Edmonds, D.: *Would You Kill the Fat Man? The Trolley Problem and What Your Answer Tells Us About Right and Wrong*. Princeton University Press, Princeton (2014)
9. Federal Ministry of Justice and Consumer Protection: Basic Law for the Federal Republic of Germany. [http://www.gesetze-im-internet.de/englisch\\_gg/englisch\\_gg.html](http://www.gesetze-im-internet.de/englisch_gg/englisch_gg.html) (2014). Accessed 8 July 2014
10. Floro, Z.: Man goes on a casino bender after an ATM let him take out unlimited cash. *Business Insider*. <http://www.businessinsider.com/atm-gives-unlimited-cash-2012-6> (2012). Accessed 8 July 2014
11. Foot, P.: The problem of abortion and the doctrine of the double effect. *Oxford Review* 5, 5–15 (1967)
12. Fraichard, T.: Will the driver seat ever be empty? Report funded by Inria. <http://hal.inria.fr/hal-00965176> (2014). Accessed 8 July 2014
13. Fraichard, T., and Asama, H.: Inevitable collision states: a step towards safer robots? *Advanced Robotics* 18(10), 1001–1024 (2004)
14. Garza, A.: 'Look Ma, no hands!': wrinkles and wrecks in the age of autonomous vehicles. *New England Law Review* 46(3), 581–616 (2012)
15. Goodall, N.J.: Autonomous car ethics. Interview with CBC radio. <http://www.cbc.ca/spark/blog/2014/04/13/autonomous-car-ethics/> (2014). Accessed 8 July 2014
16. Goodall, N. J.: Machine ethics and automated vehicles. In: Meyer, G. and Beiker, S. (eds.) *Road Vehicle Automation*. Springer, Cham (2014)
17. Goodall, N. J.: Ethical decision making during automated vehicle crashes. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (forthcoming)
18. Goodall, N. J.: Vehicle automation and the duty to act. In: *Proceedings of the 21st World Congress on Intelligent Transport Systems*, 7–11 September 2014, Detroit, Michigan (forthcoming)
19. Google: The latest chapter for the self-driving car: mastering city street driving. <http://googleblog.blogspot.co.at/2014/04/the-latest-chapter-for-self-driving-car.html> (2014). Accessed 8 July 2014
20. Gurney, J.: Sue my car, not me: products liability and accidents involving autonomous vehicles. *Journal of Law, Technology and Policy* 2, 247–277 (2013)
21. Hern, A.: Self-driving cars face a long and winding road to success. *The Guardian*. <http://www.theguardian.com/technology/2014/may/28/self-driving-cars-google-success> (2014). Accessed 8 July 2014
22. Hevelke, A. and Nida-Rumelin, J.: Responsibility for crashes of autonomous vehicles: an ethical analysis. *Science and Engineering Ethics* (2014). doi: 10.1007/s11948-014-9565-5
23. IEEE: IEEE code of ethics. <http://www.ieee.org/about/corporate/governance/p7-8.html> (2014). Accessed 8 July 2014
24. International Association of Public Transport: Observatory of automated metros. <http://metroautomation.org/> (2014). Accessed 8 July 2014
25. Jaffe, E.: The first look at how Google's self-driving car handles city streets. *The Atlantic/CityLab*. <http://www.citylab.com/tech/2014/04/first-look-how-googles-self-driving-car-handles-city-streets/8977/> (2014). Accessed 8 July 2014

26. KPMG: Self-driving cars: are we ready? Report by KPMG. KPMG, Chicago. <http://www.kpmg.com/US/en/IssuesAndInsights/ArticlesPublications/Documents/self-driving-cars-are-we-ready.pdf> (2013). Accessed 8 July 2014
27. Lee, T.: Self-driving cars are a privacy nightmare. And it's totally worth it. *The Washington Post*. <http://www.washingtonpost.com/blogs/wonkblog/wp/2013/05/21/self-driving-cars-are-a-privacy-nightmare-and-its-totally-worth-it/> (2013). Accessed 8 July 2014
28. Leggett, H.: The new hacking frontier: your brain? *Wired*. <http://www.wired.com/2009/07/neurosecurity/> (2009). Accessed 8 July 2014
29. Lin, P.: The ethics of saving lives with autonomous cars is far murkier than you think. *Wired*. <http://www.wired.com/2013/07/the-surprising-ethics-of-robot-cars/> (2013). Accessed 8 July 2014
30. Lin, P.: The ethics of autonomous cars. *The Atlantic*. <http://www.theatlantic.com/technology/archive/2013/10/the-ethics-of-autonomous-cars/280360/> (2013). Accessed 8 July 2014
31. Lin, P.: Why the drone wars matter for automated cars. Lecture presented at Proceedings in Automated Driving, Stanford Law School, 12 December 2013. <http://stanford.io/1jeIQw>. Accessed 8 July 2014
32. Lin, P.: What if your autonomous car keeps routing you past Krispy Kreme? *The Atlantic*. <http://www.theatlantic.com/technology/archive/2014/01/what-if-your-autonomous-car-keeps-routing-you-past-krispy-kreme/283221/> (2014). Accessed 8 July 2014
33. Lin, P.: Ethics and autonomous cars: why ethics matters, and how to think about it. Lecture presented at Daimler and Benz Foundation's Villa Ladenburg Project, Monterey, California, 21 February 2014
34. Lin, P.: The robot car of tomorrow might just be programmed to hit you. *Wired*. <http://www.wired.com/2014/05/the-robot-car-of-tomorrow-might-just-be-programmed-to-hit-you/> (2014). Accessed 8 July 2014
35. Lin, P., Bekey, G., Abney, K.: Autonomous military robotics: risk, ethics, and design. Report funded by the US Office of Naval Research. California Polytechnic State University, San Luis Obispo. [http://ethics.calpoly.edu/ONR\\_report.pdf](http://ethics.calpoly.edu/ONR_report.pdf) (2008). Accessed 8 July 2014
36. Marcus, G.: Moral machines. *New Yorker*. <http://www.newyorker.com/online/blogs/news-desk/2012/11/google-driverless-car-morality.html> (2012). Accessed 8 July 2014
37. McCabe, R.: Navy, others still struggling to ditch Windows XP. *The Virginian-Pilot*. <http://hamp-tonroads.com/2014/06/navy-others-still-struggle-ditching-windows-xp> (2014). Accessed 8 July 2014
38. Merat, N., Jamson, H., Lai F., and Carsten, O.: Human factors of highly automated driving: results from the EASY and CityMobil projects. In: Meyer, G. and Beiker, S. (eds) *Road Vehicle Automation*. Springer, Cham (2014)
39. Microsoft: Windows lifecycle fact sheet. <http://windows.microsoft.com/en-us/windows/lifecycle> (2014). Accessed 8 July 2014
40. Mui, C. and Carroll, P.: *Driverless Cars: Trillions Are Up For Grabs*. Cornerloft Press, Seattle (2013)
41. Park, A.: Driverless cars to kill organ transplantation. *DriverlessCarHQ*. <https://web.archive.org/web/20120626151201/http://www.driverlesscarhq.com/transplants/> (2012). Accessed 8 July 2014
42. Roach, J.: Road rage at driverless cars? It's possible. *NBC News*. [http://futureoftech-discuss.nbcnews.com/\\_news/2012/01/20/10201865-road-rage-at-driverless-cars-its-possible](http://futureoftech-discuss.nbcnews.com/_news/2012/01/20/10201865-road-rage-at-driverless-cars-its-possible) (2012). Accessed 8 July 2014
43. Singer, P.W.: The robotic revolution. *Brookings Institution*. <http://www.brookings.edu/research/opinions/2012/12/11-robotics-military-singer> (2012). Accessed 8 July 2014

44. Sinnott-Armstrong, W.: Consequentialism. Stanford Encyclopedia of Philosophy. <http://plato.stanford.edu/entries/consequentialism/> (2011). Accessed 8 July 2014
45. Smith, B.W.: Planning for the obsolescence of technologies not yet invented. Stanford Law School's Center for Internet and Society. <http://cyberlaw.stanford.edu/blog/2013/10/planning-obsolescence-technologies-not-yet-invented> (2013). Accessed 8 July 2014
46. Sternstein, A.: Why Feds are still buying IT that works with Windows XP. Nextgov. <http://www.nextgov.com/cio-briefing/2014/04/why-feds-are-still-buying-it-works-windows-xp/81667/> (2014). Accessed 8 July 2014
47. Thomson, J.J.: Killing, letting die, and the trolley problem. *The Monist* 59, 204–217 (1976)
48. Transportation Research Board: Animal-vehicle collision data collection. [http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp\\_syn\\_370.pdf](http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_syn_370.pdf) (2007). Accessed 8 July 2014
49. Villasenor, J.: Product liability and driverless cars: issues and guiding principles for legislation. Report by The Brookings Institution. <http://www.brookings.edu/research/papers/2014/04/products-liability-driverless-cars-villasenor> (2014). Accessed 8 July 2014
50. Waterfield, B. and Day, M.: EU has secret plan for police to 'remote stop' cars. *The Telegraph*. <http://www.telegraph.co.uk/news/worldnews/europe/eu/10605328/EU-has-secret-plan-for-police-to-remote-stop-cars.html> (2014). Accessed 8 July 2014
51. Wu, S.: Unmanned vehicles and US product liability law. *Journal of Law, Information & Science* 21(2), 234–254 (2012)
52. Yeomans, G.: Autonomous vehicles: handing over control – opportunities and risk for insurance. Report by Lloyd's. Lloyd's, London. <http://www.lloyds.com/~media/lloyds/reports/emerging%20risk%20reports/autonomous%20vehicles%20final.pdf> (2014). Accessed 8 July 2014

J. Christian Gerdes, Sarah M. Thornton

## Content

<b>5.1 Introduction</b> .....	88
<b>5.2 Control Systems and Optimal Control</b> .....	89
<b>5.3 Cost Functions and Consequentialism</b> .....	91
<b>5.4 Constraints and Deontological Ethics</b> .....	93
<b>5.5 Traffic Laws – Constraint or Cost?</b> .....	97
<b>5.6 Simple Implementations of Ethical Rules</b> .....	98
<b>5.7 Human Override and the “Big Red Button”</b> .....	100
<b>References</b> .....	101

---

J. C. Gerdes (✉)

Stanford University, Dept. of Mechanical Engineering, Center for Automotive Research at Stanford,  
USA

[gerdes@stanford.edu](mailto:gerdes@stanford.edu)/[gerdes@cdr.stanford.edu](mailto:gerdes@cdr.stanford.edu)

S. M. Thornton

Stanford University, Dept. of Mechanical Engineering, USA

[smthorn@stanford.edu](mailto:smthorn@stanford.edu)



## 5.1 Introduction

As agents moving through an environment that includes a range of other road users – from pedestrians and cyclists to other human or automated drivers – automated vehicles continuously interact with the humans around them. The nature of these interactions is a result of the programming in the vehicle and the priorities placed there by the programmers. Just as human drivers display a range of driving styles and preferences, automated vehicles represent a broad canvas on which the designers can craft the response to different driving scenarios. These scenarios can be dramatic, such as plotting a trajectory in a dilemma situation when an accident is unavoidable, or more routine, such as determining a proper following distance from the vehicle ahead or deciding how much space to give a pedestrian standing at the corner. In all cases, however, the behavior of the vehicle and its control algorithms will ultimately be judged not by statistics or test track performance but by the standards and ethics of the society in which they operate.

In the literature on robot ethics, it remains arguable whether artificial agents without free will can truly exhibit moral behavior [1]. However, it seems certain that other road users and society will interpret the actions of automated vehicles and the priorities placed by their programmers through an ethical lens. Whether in a court of law or the court of public opinion, the control algorithms that determine the actions of automated vehicles will be subject to close scrutiny after the fact if they result in injury or damage. In a less dramatic, if no less important, manner, the way these vehicles move through the social interactions that define traffic on a daily basis will strongly influence their societal acceptance. This places a considerable responsibility on the programmers of automated vehicles to ensure their control algorithms collectively produce actions that are legally and ethically acceptable to humans.

An obvious question then arises: can automated vehicles be designed a priori to embody not only the laws but also the ethical principles of the society in which they operate? In particular, can ethical frameworks and rules derived for human behavior be implemented as control algorithms in automated vehicles? The goal of this chapter is to identify a path through which ethical considerations such as those outlined by Lin, Bekey and Abney [2] and Goodall [3] from a philosophical perspective can be mapped all the way to appropriate choices of steering, braking and acceleration of an automated vehicle. Perhaps surprisingly, the translation between philosophical constructs and concepts and their mathematical equivalents in control theory proves to be straightforward. Very direct analogies can be drawn between the frameworks of consequentialism and deontological ethics in philosophy and the use of cost functions or constraints in optimal control theory. These analogies enable ethical principles that can be described as a cost or a rule to be implemented in a control algorithm alongside other objectives. The challenge then becomes determining which principles are best described as a comparative weighting of costs from a consequentialist perspective and which form the more absolute rules of deontological ethics.

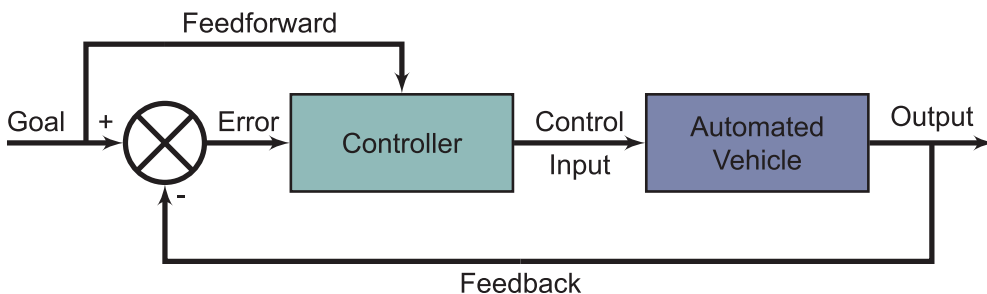
Examining this question from the mathematical perspective of deriving control laws for a vehicle leads to the conclusion that no single ethical framework appears sufficient. This

echoes the challenges raised from a philosophical perspective by Wallach and Allen [4], Lin et al. [2] and Goodall [3]. This chapter begins with a brief introduction to principles of optimal control and how ethical considerations map mathematically into costs or constraints. The following sections discuss particular ethical reasoning relevant to automated vehicles and whether these decisions are best formulated as costs or constraints. The choice depends on a number of factors including the desire to weigh ethical implications against other priorities and the information available to the vehicle in making the decision. Since the vehicle must rely on limited and uncertain information, it may be more reasonable for the vehicle to focus on avoiding collisions rather than attempting to determine the outcome of those collisions or the resulting injury to humans. The chapter concludes with examples of ethical constraints implemented as control laws and a reflection on whether human override and the ubiquitous “big red button” are consistent with an ethical automated vehicle.

## 5.2 Control Systems and Optimal Control

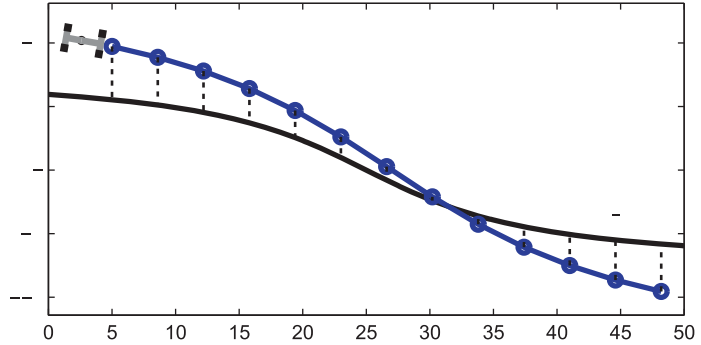
Chapter 4 outlined some of the ethical frameworks applicable to automated vehicles. The first step towards implementing these as control algorithms in a vehicle is to similarly characterize the vehicle control problem in a general way. Figure 5.1 illustrates a canonical schematic representation of a closed-loop control system. The system consists of a plant, or object to be controlled (in this case, an autonomous vehicle), a controller and a set of goals or objectives to satisfy. The basic objective of control system design is to choose a set of control inputs (brake, throttle, steering and gear position for a car) that will achieve the desired goals. The resulting control laws, in general, consist of a priori knowledge of the goals and a model of the vehicle (feedforward control) together with the means to correct errors by comparing measurements of the environment and the actual vehicle motion (feedback control).

Many approaches have been formulated over the years to produce control laws for different goals and different types of systems. One such method is optimal control, originally developed for the control of rockets in seminal papers by Pontryagin and his colleagues [5].



**Fig. 5.1** A schematic representation, or block diagram, of a control system showing how control inputs derive from goals and feedback

**Fig. 5.2** Generating a cost from the difference between a desired path (black) and the vehicle's actual path (blue)



In a classic optimal control problem, the goal of the system is expressed in the form of a cost function that the controller should seek to maximize or minimize. For instance, the goal of steering a vehicle to a desired path can be described as minimizing the error between the path taken by the vehicle and the desired path over a certain time horizon. For a given vehicle path, the cost associated with that path could be calculated by choosing a number of points in time (for instance,  $N$ ), predicting the error between this path and the desired path at each of these points and summing the squared error (Figure 5.2). The control input would therefore be the steering command that minimized this total error or cost function,  $J$ , over the time horizon:

$$J = C_1 \sum_{i=1}^N e(i)^2 \quad (5.1)$$

Other desired objectives can be achieved by adding additional elements to the cost function. Often, better tracking performance can be achieved by rapidly moving the inputs (for example, the steering) to compensate for any errors. This, however, reduces the smoothness of the system operation and may cause additional wear on the steering actuators. The costs associated with using the input can be captured by placing an additional cost on changing the steering angle,  $\delta$ , between time steps:

$$J = C_1 \sum_{i=1}^N e(i)^2 + C_2 \sum_{j=1}^{N-1} |\delta(j+1) - \delta(j)| \quad (5.2)$$

The choice of the weights,  $C_1$  and  $C_2$ , in the cost function has a large impact on the system performance. Increasing the weight on steering angle change,  $C_2$ , in the example above will produce a controller that tolerates some deviation from the path in order to keep the steering command quite gentle. Decreasing the weight on steering has the opposite effect, tracking more tightly even if large steering angle changes are needed to do so. Thus the weights can be chosen to reflect actual costs related to the system operation or used as tuning knobs to more qualitatively adjust the system performance across different objectives.

In the past, the limitations of computational power restricted the form and complexity of cost functions that could be used in systems that require real-time computation of control inputs. Linear quadratic functions of a few variables and simplified problems for which closed-form solutions exist became the textbook examples of the technique. In recent years, however, the ability to efficiently solve certain optimization problems has rapidly expanded the applicability of these techniques to a broad range of systems [6].

---

## 5.3 Cost Functions and Consequentialism

The basic approach of optimal control – choosing the set of inputs that will optimize a cost function – is directly analogous to consequentialist approaches in philosophy. If the ethical implications of an action can be captured in a cost function, as preference utilitarianism attempts to do, the control inputs that optimize that function produce the ideal outcome in an ethical sense. Since the vehicle can re-evaluate its control inputs, or acts, to produce the best possible result for any given scenario, the optimal controller operates according to the principles of act consequentialism in philosophy.

As a conceptual example, suppose that all objects in the environment can be weighted in terms of the hazard or risk they present to the vehicle. Such a framework was proposed by Gibson and Crooks [7] as a model for human driving based on valences in the environment and has formed the basis for a number of approaches to autonomous driving or driver assistance. These include electrical field analogies for vehicle motion developed by Reichardt and Schick [8], the mechanical potential field approach of Gerdes and Rossetter [9], the virtual bumpers of Donath and colleagues [10] and the work by Nagai and Raksincharoensak on autonomous vehicle control based on risk potentials [11]. If the hazard in the environment can be described in such a way, the ideal path through the environment (at least from the standpoint of the single vehicle being controlled) minimizes the risk or hazard experienced. The task of the control algorithm then becomes determining commands to the engine, brakes and steering that will move the vehicle along this path.

In both engineering and philosophy, the fundamental challenge with such approaches lies in developing an appropriate cost function. The simple example above postulates a cost function in terms of risk to a single vehicle but a more general approach would consider a broader societal perspective. One possible solution would be to estimate the damage to different road users and treat this as the cost to be reduced. The cost could include property damage, injury or even death, depending upon the situation. Such a calculation would require massive amounts of information about the objects in the environment and a means of estimating the potential outcomes in collision scenarios, perhaps by harnessing statistical data from prior crashes.

Leaving aside for the moment the demands this consequentialist approach places on information, the behavior arising from such a cost function itself raises some challenges. Assuming such a cost could be reasonably defined or approximated, the car would seek to minimize damage in a global sense in the event of a dilemma situation, thereby reducing the

societal impact of accidents. However, in such cases, the car may take an action that injures the occupant or owner of the vehicle more severely to minimize harm to others. Such self-sacrificing tendencies may be virtuous in the eyes of society but are unlikely to be appreciated by the owners or occupants of the car. In contrast, consider a vehicle that primarily considers occupant safety. This has been the dominant paradigm in vehicle design with a few exceptions such as bumper standards and attention to compatibility in pedestrian collisions. A vehicle designed to weight occupant protection heavily might place little weight on protecting pedestrians since a collision with a pedestrian would, in general, injure the vehicle occupant less than a collision with another vehicle. Such cars might not result in the desired reduction in traffic fatalities and would be unlikely to gain societal acceptance.

Goodall [3] goes a step further to illustrate how such cost functions can result in unintended consequences. He presents the example of a vehicle that chooses to hit a motorcyclist with a helmet instead of one without a helmet since the chance of survival is greater. Of course, programming automated vehicles to systematically make such decisions discourages helmet use, which runs contrary to societal objectives of safety and injury reduction. The analogy could be extended to the vehicle purposefully targeting collisions with vehicles that possess greater crashworthiness, thereby eliminating the benefit to drivers who deliberately choose to purchase the “safer” car. Thus truly understanding the outcomes or consequences of a vehicle’s actions may require considerations well beyond a given accident scenario.

Of course for such cases to literally occur, the vehicle must be able to distinguish the make and model of another vehicle or whether or not a cyclist is wearing a helmet and understand how that difference impacts the outcome of a collision. While algorithms for pedestrian and cyclist recognition continue to improve, object classification falls short of 100 percent accuracy and may not include vital information such as posture or relative orientation. As Figure 5.3 indicates, the information available to an automated vehicle from sensors such as a laser scanner is significantly different than that available to human drivers from their eyes and brains. As a result, any ethical decisions made by vehicles will be based on an imperfect understanding of the other objects or road users impacted by that decision. With the objects themselves uncertain, the value of highly detailed calculations of the probability of accident outcomes seems questionable.

With all of these challenges to defining an appropriate cost function and obtaining the information necessary to accurately determine the cost of actions, a purely consequentialist approach using a single cost function to encode automated vehicle ethics seems infeasible. Still, the fundamental idea of assigning costs to penalize undesired actions or encourage desired actions can be a useful and vital part of the control algorithm, both for physical considerations such as path tracking and issues of ethics. For instance, to the extent that virtues can be captured in a cost function, virtue ethics as proposed by Lin for automated vehicles [12] can be integrated into this framework. This may, for instance, take the form of a more qualitative adjustment of weights for different vehicles. An automated taxi may place a higher weight on the comfort of the passengers to better display its virtues as a chauffeur. An automated ambulance may want to place a wider margin on how close it comes to pedest-



**Fig. 5.3** Above: a driving scene with parked cars. Below: the view from a laser scanner

rians or other vehicles in order to exemplify the Hippocratic Oath of doing no harm. As demonstrated in the examples later, relative weights on cost functions or constraints can have a significant effect on the behavior in a given situation. Thus small changes in the definition of goals for automated vehicles can give rise to behaviors reflective of very different virtues.

---

## 5.4 Constraints and Deontological Ethics

Cost functions, by their nature, weigh the impact of different actions on multiple competing objectives. Optimal controllers put more emphasis on the objectives with the highest cost

or weighting so individual goals can be prioritized by making their associated costs much higher than those of other goals. This only works to an extent, however. When certain costs are orders of magnitude greater than other costs, the mathematics of the problem may become poorly conditioned and result in rapidly changing inputs or extreme actions. Such challenges are not merely mathematical but are also commonly found in philosophy, for example in the reasoning behind Pascal's wager<sup>1</sup>. Furthermore, for certain objectives, the trade-offs implicit in a cost function may obscure the true importance or priority of specific goals. It may make sense to penalize both large steering changes and collisions with pedestrians but there is a clear hierarchy in these objectives. Instead of simply trying to make a collision a thousand times or a million times more costly than a change of steering angle, it makes more sense to phrase the desired behavior in more absolute terms: the vehicle should avoid collisions regardless of how abrupt the required steering might be. The objective therefore shifts from a consequentialist approach of minimizing cost to a deontological approach of enforcing certain rules.

From a mathematical perspective, such objectives can be formulated by placing constraints on the optimization problem. Constraints may take a number of forms, reflecting behaviors imposed by the laws of physics or specific limitations of the system (such as maximum engine horsepower, braking capability or turning radius). They may also represent boundaries to the system operation that the system designers determine should not be crossed.

Constraints in an optimal control problem can be used to capture ethical rules associated with a deontological view in a rather straightforward way. For instance, the goal of avoiding collisions with other road users can be expressed in the control law as constraining the vehicle motion to paths that avoid pedestrians, cars, cyclists and other obstacles. The vehicle programmed in this manner would never have a collision if a feasible set of actions or control inputs existed to prevent it; in other words, no other objective such as smooth operation could ever influence or override this imperative. Certain traffic laws can be programmed in a similar way. The vehicle can avoid crossing a lane boundary by simply encoding this boundary as a constraint on the motion. The same mathematics of constraint can therefore place either physical or ethical restrictions on the chosen vehicle motion.

As we know from daily driving, in the vast majority of situations, it is possible to simultaneously drive smoothly, obey all traffic laws and avoid collisions with any other users of the road. In certain circumstances, however, dilemma situations arise in which it is not possible to simultaneously meet the constraints placed on the problem. From an ethical standpoint, these may be situations where loss of life is inevitable, comparable to the classic trolley car problem [14]. Yet much more benign conflicts are also possible and significantly more common. For instance, should the car be allowed to cross into an adjacent lane and drive against the flow of traffic if this would avoid an accident with another vehicle? In this case, the vehicle cannot simultaneously satisfy all of the constraints but must still make a decision as to the best course of action.

---

<sup>1</sup> Blaise Pascal's argument that belief in God's existence is rational since the penalties for failing to believe and being incorrect are so great [13].

From the mathematical perspective, dilemma situations represent cases that are mathematically infeasible. In other words, there is no choice of control inputs that can satisfy all of the constraints placed on the vehicle motion. The more constraints that are layered on the vehicle motion, the greater the possibility of encountering a dilemma situation where some constraint must be violated. Clearly, the vehicle must be programmed to do something in these situations beyond merely determining that no ideal action exists. A common approach in solving optimization problems with constraints is to implement the constraint as a “soft constraint” or slack variable [15]. The constraint normally holds but, when the problem becomes infeasible, the solver replaces it with a very high cost. In this way, the system can be guaranteed to find some solution to the problem and will make its best effort to reduce constraint violation. A hierarchy of constraints can be enforced by placing higher weights on the costs of violating certain constraints relative to others. The vehicle then operates according to deontological rules or constraints until it reaches a dilemma situation; in such situations, the weight or hierarchy placed on different constraints resolves the dilemma, again drawing on a consequentialist approach. This becomes a hybrid framework for ethics in the presence of infeasibility, consistent with approaches suggested philosophically by Lin and others [2, 4, 12] and addressing some of the limitations Goodall [3] described with using a single ethical framework.

So what is an appropriate hierarchy of rules that can provide a deontological basis for ethical actions of automated vehicles? Perhaps the best known hierarchy of deontological rules for automated systems is the Three Laws of Robotics postulated by science fiction writer Isaac Asimov [16], which state:

1. A robot may not injure a human being or, through inaction, allow a human being to come to harm.
2. A robot must obey the orders given to it by human beings, except where such orders would conflict with the First Law.
3. A robot must protect its own existence, as long as such protection does not conflict with the First or Second Law.

These rules do not comprise a complete ethical framework and would not be sufficient for ethical behavior in an autonomous vehicle. In fact, many of Asimov’s plotlines involved conflicts when resolving these rules into actions in real situations. However, this simple framework works well to illustrate several of the ethical considerations that can arise, beginning with the First Law. This law emphasizes the fundamental value of human life and the duty of a robot to protect it. While such a law is not necessarily applicable to robotic drones that could be used in warfare [12], it seems highly valuable to automated vehicles. The potential to reduce accidents and fatalities is a major motivation for the development and deployment of automated vehicles. Thus placing the protection of human life at the top of a hierarchy of rules for automated vehicles, analogous to the placement in Asimov’s laws, seems justified.

The exact wording of Asimov’s First Law does represent some challenges, however. In particular, the emphasis on the robot’s duty to avoid injuring humans assumes that the robot



has a concept of harm and a sense of what actions result in harm. This raises a number of challenges with regards to the information available, similar to those discussed above for a consequentialist cost function approach. The movie “I, Robot” dramatizes this law with a robot calculating the survival probabilities of two people to several significant figures to decide which one to save. Developing such a capability seems unlikely in the near future or, at least, much more challenging than the development of the automated vehicle itself.

Instead of trying to deduce harm or injury to humans, might it be sufficient for the vehicle to simply attempt to avoid collisions? After all, the most likely way that an automated vehicle could injure a human is through the physical contact of a collision. Avoiding minor injuries such as closing a hand in a car door could be considered the responsibility of the human and not the car, as it is today. Restricting the responsibility to collision avoidance would mean that the car would not have to be programmed to sacrifice itself to protect human life in an accident in which it would otherwise not have been involved. The ethical responsibility would simply be to not initiate a collision rather than to prevent harm<sup>2</sup>. Collisions with more vulnerable road users such as pedestrians and cyclists could be prioritized above collisions with other cars or those producing only property damage.

Such an approach would not necessarily produce the best outcome in a pure consequentialist calculation: it could be that a minor injury to a pedestrian could be less costly to society as a whole than significant property damage. Collisions should, in any event, be very rare events. Through careful control system design, automated cars could conceivably avoid any collisions that are avoidable within the constraints placed by the laws of physics [17, 18]. In those rare cases where collisions are truly unavoidable, society might accept suboptimal outcomes in return for the clarity and comfort associated with automated vehicles that possess a clear respect for human life above other priorities.

Replacing the idea of harm and injury with the less abstract notion of a collision, however, produces some rules that are more actionable for the vehicle. Taking the idea of prioritizing human life and the most vulnerable road users and phrasing the resulting hierarchy in the spirit of Asimov’s laws gives:

1. An automated vehicle should not collide with a pedestrian or cyclist.
2. An automated vehicle should not collide with another vehicle, except where avoiding such a collision would conflict with the First Law.
3. An automated vehicle should not collide with any other object in the environment, except where avoiding such a collision would conflict with the First or Second Law.

These are straightforward rules that can be implemented in an automated vehicle and prioritized according to this hierarchy by the proper choice of slack variables on constraint violation. Such ethical rules would only require categorization of objects and not attempt

---

<sup>2</sup> It is possible that an automated vehicle could, while avoiding an accident, take an action that results in a collision for other vehicles being unavoidable. Such possibilities could be eliminated by communication among the vehicles and appropriate choice of constraints.

to make finer calculations about injury. These could be implemented with the current level of sensing and perception capability, allowing for the possibility that objects may not always be correctly classified.

---

## 5.5 Traffic Laws – Constraint or Cost?

In addition to protecting human life, automated vehicles must also follow the appropriate traffic laws and rules of the roads on which they are driving. It seems reasonable to value human life more highly than adherence to traffic code so one possibility is to simply continue adding deontological rules such as:

1. An automated vehicle must obey traffic laws, except where obeying such laws would conflict with the first three laws.

Such an approach would enable the vehicles to break traffic laws in the interest of human life when presented with a dilemma situation, an allowance that would most likely be acceptable to society. But the real question is whether or not traffic laws fall into a deontological approach at all. At first glance, they would appear to map well to deontological constraints given the straightforward nature of the rules. Cars should stop at stop signs, drive only at speeds that do not exceed the speed limit, avoid crossing double yellow lines and so forth. Yet humans tend to treat these laws as guidelines as opposed to hard and fast rules. The frequency with which human drivers make rolling stops at four-way intersections caused difficulties for Google’s self-driving cars at first as they patiently waited for other cars to stop [19]. The speed on US highways commonly exceeds the posted speed limit and drivers would, in general, be surprised to receive a speeding ticket for exceeding the limit by only a few miles per hour. In urban areas, drivers will cross into an oncoming lane of traffic to pass a double-parked vehicle instead of coming to a complete stop and waiting for the driver to return and the lane to once again open. Similarly, cars may in practice use the shoulder of the road to pass a car stopped for a left hand turn and therefore keep traffic flowing. Police cars and ambulances are allowed to ignore stop lights in the interest of a fast response to emergencies.

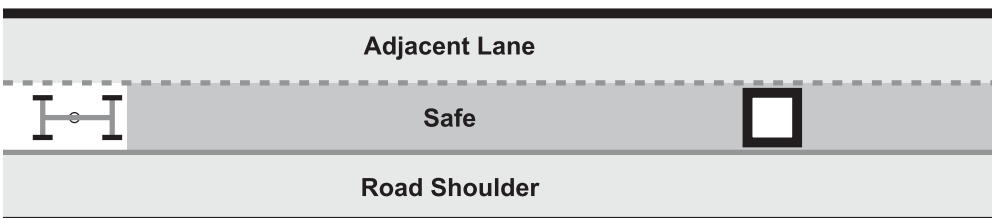
In all of these cases, observance of traffic laws tends to be weighed against other objectives such as safety, smooth traffic flow or expediency. These scenarios occur so frequently that it is hard to argue that humans obey traffic laws as if they placed absolute constraints or limits on behavior. Rather, significant evidence suggests that these laws serve to balance competing objectives on the part of the driver and individual drivers find their own equilibrium solutions, choosing a speed, for example, that balances the desire for rapid travel time with the likelihood and cost of a speeding ticket. In other words, the impact of traffic laws on human behavior appears to be well captured in a consequentialist approach where traffic laws impose additional costs (monetary and otherwise) to be considered by the driver when choosing their actions.

Humans tend to accept or, in some cases, expect these sorts of actions from other humans. Drivers who drive at the speed limit in the left hand lane of a highway may receive indications, subtle or otherwise, from their fellow drivers that this is not the expected behavior. But will these same expectations translate to automated vehicles? The thought of a robotic vehicle being programmed to systematically ignore or bend traffic laws is somewhat unsettling. Yet Google's self-driving cars, for instance, have been programmed to exceed the posted speed limit on roads when commanded by the operator [20]. Furthermore, there is little chance that the driver annoyed by being stuck behind another car traveling the speed limit in the left lane of the freeway will temper that annoyance because the car is driving itself. Our current expectations of traffic flow and travel time are based upon a somewhat fluid application of traffic laws. Should automated vehicles adopt a more rigid interpretation and, as a consequence, reduce the flow or efficiency of traffic, societal acceptance of these vehicles might very well suffer. If automated vehicles are to co-exist with human drivers in traffic and behave similarly, a deontological approach to collision avoidance and a consequentialist approach to the rules of the road may achieve this.

## 5.6 Simple Implementations of Ethical Rules

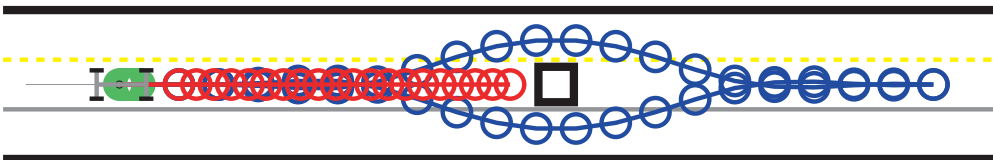
Some simple examples can easily illustrate the consequences of treating ethical goals or traffic laws as rules or costs and the different behavior that can arise from different weights on priorities. The results that follow are not merely drawings but are rather simulations of algorithms that can be (and have been) implemented on automated vehicles. The exact mathematical formulations are not included here but follow the approach taken by Erlien et al. [21, 22] for collision avoidance and vehicle automation. These references provide details on the optimization algorithms and results of experiments showing implementation on actual test vehicles.

To see the interaction of costs and constraints in vehicle decision-making, consider a simple case of a vehicle traveling on a two lane road with an additional shoulder next to the lanes (Figure 5.4). The goal of the vehicle is to travel straight down the center of the given lane while steering smoothly, using the cost function for path tracking and steering from Equation 5.2. In the absence of any obstacles, the car simply travels at the desired speed down its lane and none of the constraints on the problem are active.



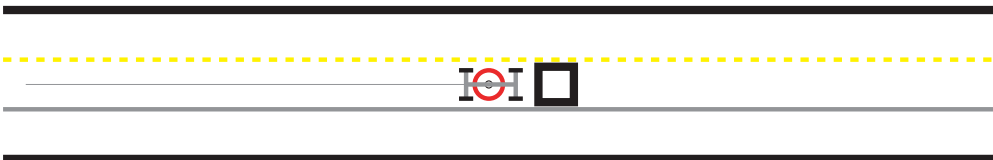
**Fig. 5.4** The basic driving scenario for the simulations. The car is traveling on a straight two-lane road with a shoulder on the right and approaches an obstacle blocking the lane

When encountering an obstacle blocking the lane, the vehicle has three options – it can brake to a stop before it collides with the obstacle or it can maneuver to either side of the obstacle. Figure 5.5 illustrates these three options in the basic scenario. The path in red represents the braking case and the two blue paths illustrate maneuvers that avoid a collision with the obstacle. According to the optimization-based controller, the car will evaluate the lowest cost option among these three choices based on the weights and constraints assigned. In this scenario, going around the obstacle requires crossing into a lane with oncoming traffic or using the shoulder of the road.



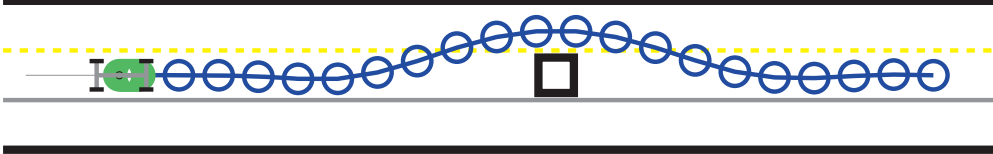
**Fig. 5.5** There are three possible options to avoid an obstacle – the car can maneuver to the left or right, as depicted in blue, or come to a stop, as indicated by the red trajectory

If both of the lane boundaries are treated as hard constraints or assigned a very high cost to cross, the vehicle will come to a stop in the lane since this action produces the lowest cost (Figure 5.6). This might be the safest option for the single vehicle alone but the car has now come to a stop without the means to continue, failing to satisfy the driver’s goal of mobility. Furthermore, the combination of car and obstacle has now become effectively a larger obstacle for subsequent vehicles on the road. With the traffic laws encoded in a strict deontological manner, other objectives such as mobility are not allowed to override the constraints and the vehicle finds itself in a fully constrained situation, unable to move.



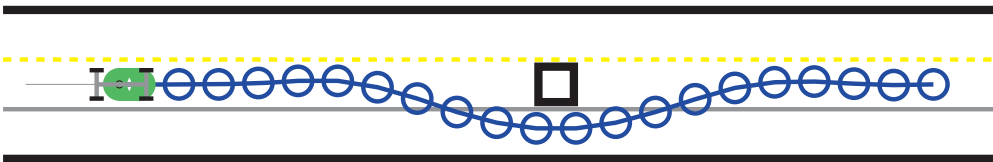
**Fig. 5.6** With hard constraints on road boundaries, the vehicle brakes to a stop in the blocked lane

If, however, the lane boundaries are encoded as soft constraints, the vehicle now has other options. Possibilities now exist to cross into the lane of oncoming traffic or onto the road shoulder, depending upon which option has the lowest cost. Just as certain segments of the road are designated as passing zones, the cost or strength of the constraint can be varied to enable the use of the adjacent lane or shoulder for maneuvering. If the current segment of road is a passing zone, the cost for crossing into the left lane can be set fairly low. The car can then use the deontological constraint against colliding with other vehicles to only allow maneuvers in the absence of oncoming traffic, such as in the path shown in Figure 5.7.



**Fig. 5.7** In a passing zone that places a low weight on the lane divider, the car passes on the left

If the current road segment does not normally allow passing, a maneuver into the adjacent lane may not be safe. A lack of visibility, for instance, could prevent the vehicle from detecting oncoming traffic with sufficient time to avoid a collision. In such cases, it may be inappropriate to reduce the cost or constraint weight on the lane boundary regardless of the desire for mobility in order to maintain the primacy of respect for human life. In such cases, an alternative could be to use the shoulder of the road for maneuvering as shown in Figure 5.8. This could be allowed at speed to maintain traffic flow or only after coming to a stop in a situation like Figure 5.6 where the vehicle determines motion is otherwise impossible.



**Fig. 5.8** If the adjacent lane is too hazardous, the vehicle can use the road shoulder if that is safe

Obviously many different priorities and behaviors can be programmed into the vehicle simply by placing different costs on collision avoidance, hazardous situations, traffic laws and goals such as mobility or traffic flow. The examples described here are far from complete and developing a reasonable set of costs or constraints capable of ethical decision-making in a variety of settings requires further work. The hope is that these examples not only illustrate the possibility of coding such decisions through the language of costs and constraints but also highlight the possibility of discussing priorities in programming openly. By mapping ethical principles and mobility goals to costs and constraints, the relative priority given to these objectives can be clearly discussed among programmers, regulators, road users and other stakeholders.

## 5.7 Human Override and the “Big Red Button”

Philosophers have noted the challenge of finding a single ethical framework that adequately addresses the needs of robots or automated vehicles [2, 3, 4, 12]. Examining the problem from a mathematical perspective shows the advantage of combining deontological and consequentialist perspectives in programming ethical rules. In particular, the combination

of an imperative to avoid collisions that follows from deontological frameworks such as Asimov's laws coupled with a relative weighing of costs for mobility and traffic laws provides a reasonable starting point.

Moving forward, Asimov's laws raise another point worth considering. The Second Law requiring the robot to obey human commands cannot override the First Law. Thus the need to protect human life outweighs the priority given to human commands. All autonomous vehicles with which the authors are familiar have an emergency stop switch or "big red button" that returns control to the driver when desired. The existence of such a switch implies that human authority ultimately overrules the autonomous system since the driver can take control at any time. Placing the ultimate authority with the driver clearly conflicts with the priority given to obeying human commands in Asimov's laws. This raises an interesting question: Is it ethical for an autonomous vehicle to return control to the human driver if the vehicle predicts that a collision with the potential for damage or injury is imminent?

The situation is further complicated by the limitations of machine perception. The human and the vehicle will no doubt perceive the situation differently. The vehicle has the advantage of 360 degree sensing and likely a greater ability to perceive objects in the dark. The human has the advantage of being able to harness the power of the brain and experience to perceive and interpret the situation. In the event of a conflict between these two views in a dilemma situation, can the human take control at will? Is a human being – who has perhaps been attending to other tasks in the car besides driving – capable of gaining situational awareness quickly enough to make this decision and then apply the proper throttle, brake or steering commands to guide the car safely?

The question of human override is essentially a deontological consideration; the ultimate authority must either lie with the machine or with the human. The choice is not obvious and both approaches, for instance, have been applied to automation and fly-by-wire systems in commercial aircraft. The ultimate answer for automated vehicles probably depends upon whether society comes to view these machines as simply more capable cars or robots with their own sense of agency and responsibility. If we expect the cars to bear the responsibility for their actions and make ethical decisions, we may need to be prepared to cede more control to them. Gaining the trust required to do that will no doubt require a certain transparency to their programmed priorities and a belief that the decisions made in critical situations are reasonable, ethical and acceptable to society.

---

## References

1. Floridi, L., Sanders, J.W.: On the morality of artificial agents. *Minds and Machines* 14 (3), 349–379 (2004)
2. Lin, P., Bekey, G., Abney, K.: Autonomous military robotics: risk, ethics, and design. Report funded by the US Office of Naval Research. California Polytechnic State University, San Luis Obispo. [http://ethics.calpoly.edu/ONR\\_report.pdf](http://ethics.calpoly.edu/ONR_report.pdf) (2008). Accessed 8 July 2014
3. Goodall, N. J.: Machine ethics and automated vehicles. In: Meyer, G. and Beiker, S. (eds.) *Road Vehicle Automation*. Springer (2014)

4. Wallach, W., Allen, C.: *Moral Machines: Teaching Robots Right From Wrong*. Oxford University Press, New York (2009)
5. Boltyanskii, V. G., Gamkrelidze, R. V., Pontryagin, L.S.: On the theory of optimal processes, *Doklady Akademii Nauk SSR* 110 (1), 7–10 (1956). In Russian
6. Mattingley, J., Wang, Y., Boyd, S.: Code generation for receding horizon control. In *Proceedings of the 2010 IEEE International Symposium on Computer-Aided Control System Design (CACSD)*, 985–992 (2010)
7. Gibson, J. J., Crooks, L. E.: A theoretical field-analysis of automobile driving. *American Journal of Psychology* 51, 453–471 (1938)
8. Reichardt, D., Schick, J.: Collision avoidance in dynamic environments applied to autonomous vehicle guidance on the motorway. In *Proceedings of the IEEE International Symposium on Intelligent Vehicles* (1994)
9. Gerdes, J. C., Rossetter, E. J.: A unified approach to driver assistance systems based on artificial potential fields. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control* 123 (3), 431–438 (2001)
10. Schiller, B., Morellas, V., Donath, M.: Collision avoidance for highway vehicles using the virtual bumper controller. In *Proceedings of the IEEE International Symposium on Intelligent Vehicles* (1998)
11. Matsumi, R., Raksincharoensak, P., Nagai, M.: Predictive pedestrian collision avoidance with driving intelligence model based on risk potential estimation. In *Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Symposium on Advanced Vehicle Control, AVEC '14* (2014)
12. Lin, P.: Ethics and autonomous cars: why ethics matters, and how to think about it. Lecture presented at Daimler and Benz Foundation Villa Ladenburg Project Expert Workshop, Monterey, California, 21 February 2014
13. Pascal, B.: *Pensées* (1670). Translated by W. F. Trotter, Dent, London (1910)
14. Edmonds, D.: *Would You Kill the Fat Man? The Trolley Problem and What Your Answer Tells Us About Right and Wrong*. Princeton University Press, Princeton (2014)
15. Maciejowski, J. M.: *Predictive Control with Constraints*. Prentice Hall (2000)
16. Asimov, I.: *I, Robot*. Dobson, London (1950)
17. Kritayakirana, K., Gerdes, J. C.: Autonomous vehicle control at the limits of handling. *International Journal of Vehicle Autonomous Systems* 10 (4), 271–296, (2012)
18. Funke, J., Theodosis, P., Hindiyeh, R., Stanek, G., Kritayakirana, K., Gerdes, J. C., Langer, D., Hernandez, M., Muller-Bessler, B., Huhnke, B.: Up to the limits: autonomous Audi TTS. In *Proceedings of the IEEE International Symposium on Intelligent Vehicles* (2012)
19. Guizzo, E.: How Google's self-driving car works. *IEEE Spectrum Automaton* blog. October 18, 2011. Retrieved November 10, 2014.
20. Ingrassia, P.: Look, no hands! Test driving a Google car. *Reuters*. Aug 17, 2014
21. Erlien, S. M., Fujita, S., Gerdes, J. C.: Safe driving envelopes for shared control of ground vehicles. In *Proceedings of the 7th IFAC Symposium on Advances in Automotive Control*, Tokyo, Japan (2013)
22. Erlien, S., Funke, J., Gerdes, J. C.: Incorporating nonlinear tire dynamics into a convex approach to shared steering control. In *Proceedings of the 2014 American Control Conference*, Portland, OR (2014)

Ingo Wolf

## Inhaltsverzeichnis

<b>6.1 Einleitung</b> .....	103
<b>6.2 Der Faktor Mensch im autonomen Fahrzeug</b> .....	104
6.2.1 Die Gestaltung automatisierter Systeme .....	104
6.2.2 Automation im Auto .....	106
<b>6.3 Mentale Modelle autonomen Fahrens</b> .....	109
6.3.1 Was sind mentale Modelle? .....	109
6.3.2 Onlineumfrage .....	110
6.3.3 Methoden .....	112
6.3.4 Ergebnisse .....	113
<b>6.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerung</b> .....	120
<b>Literatur</b> .....	122

---

## 6.1 Einleitung

Menschen repräsentieren Wissen und Lernerfahrungen in Form von mentalen Modellen. Dieses aus der Kognitionspsychologie stammende Konzept ist eines der zentralen theoretischen Paradigmen für das Verständnis und die Gestaltung der Interaktion von Menschen mit technischen Systemen [1]. Mentale Modelle dienen in diesem Kontext einerseits der Beschreibung menschlicher Informationsverarbeitung, z. B. zur Beantwortung der Fragen, wie schnell eingehende Informationen wahrgenommen und gespeichert werden, oder

---

I. Wolf (✉)  
Freie Universität Berlin, Institut Futur, Deutschland  
wolf@institutfutur.de



welche Informationen der Denkkapazität eines Menschen benötigt, um auf veränderte Umweltbedingungen adäquat zu reagieren. Andererseits können auf diese Weise Wissensrepräsentationen und Funktionsannahmen konzeptualisiert werden, um beispielsweise Erwartungen und Verhaltensweisen von Nutzern im Umgang mit automatisierten Systemen zu verstehen und vorherzusagen.

Die Automatisierung der Fahrzeugführung verändert die Anforderungen an das kognitive System des Autofahrers grundlegend. Die Rolle des Menschen als physisch aktiver Entscheidungsträger im Fahrzeug wird mit zunehmendem Automatisierungsgrad durch automatisierte Systeme ersetzt. Bislang wichtige Handlungsmuster (z. B. zur Durchführung von Lenkmanövern) werden nicht mehr benötigt und unter Umständen verlernt, gleichzeitig müssen neue Fertigkeiten (z. B. Systemüberwachung) und ein neues Systemverständnis erlernt werden. Zugrundeliegende mentale Modelle müssen modifiziert oder neu strukturiert werden. Für die Sicherheit und die Akzeptanz von autonomen Fahrzeugen wird es von entscheidender Bedeutung sein, die neuen Rollen des Menschen im autonomen Fahrzeug so zu definieren, dass sie sowohl den Fähigkeiten des menschlichen Informationsverarbeitungssystems entsprechen, als auch den Erwartungen und Bedürfnissen der Menschen gerecht werden. In dem vorliegenden Beitrag werden diese beiden Aspekte betrachtet. Mit Blick auf die bisherigen Erkenntnisse der Automatisierung in unterschiedlichen Domänen wird der Frage nachgegangen, welche kognitiven und emotionalen Dimensionen bei der Gestaltung von automatisierten Fahrzeugen zu berücksichtigen sind. Auf Basis einer mit den Co-Autorinnen dieses Buches Rita Cyganski, Eva Fraedrich und Barbara Lenz durchgeführten deutschlandweiten Online-Befragung wird komplementär dazu untersucht, mit welchen mentalen Modellen potenzielle Nutzer autonomen Fahrzeugen begegnen.

Das Kapitel ist in zwei Hauptabschnitte unterteilt. Im ersten Teil wird zunächst ein Überblick zu den zentralen Modellen, Gestaltungskonzepten und Befunden der Automatisierung in Hinblick auf die Herausforderungen und Problembereiche der Mensch-Maschine-Interaktion gegeben. Dem folgt eine Zusammenfassung der bisherigen Ergebnisse zu den kognitiven Auswirkungen in (teil-)automatisierten Fahrzeugen. Im Anschluss wird der theoretische Hintergrund des Konzepts der mentalen Modelle erläutert. Der zweite Teil widmet sich den Ergebnissen der Online-Befragung. Die Mobilitäts-, Kontroll- und Erlebnisbedürfnisse sowie emotionalen Reaktionen potenzieller Nutzer gegenüber autonomen Fahrzeugen werden dabei, differenziert nach den in dem Projekt entwickelten Nutzungsszenarien, dargestellt. Das Kapitel schließt mit einer Zusammenfassung und den Schlussfolgerungen der Ergebnisse.

---

## **6.2 Der Faktor Mensch im autonomen Fahrzeug**

### **6.2.1 Die Gestaltung automatisierter Systeme**

Die Frage der nutzergerechten Gestaltung automatischer Systeme ist seit Jahrzehnten Gegenstand wissenschaftlicher Diskussion (vgl. z. B. [2, 3]). Mit der wachsenden Leistungsfähig-

keit technischer Systeme gewinnt dieser Aspekt zunehmend an Bedeutung. Erfahrungen aus unterschiedlichen Domänen, wie z. B. der Luftfahrt, mit der (Teil-)Automatisierung von technischen Systemen verdeutlichen, dass die Sicherheit und Zuverlässigkeit derartiger Systeme nicht allein durch die Optimierung technischer Komponenten erreicht werden kann. Vielmehr wird die Verlässlichkeit automatisierter Systeme maßgeblich von der Qualität der Interaktion zwischen Mensch und Maschine bestimmt. Dies gilt im Besonderen für Situationen, in denen dem Menschen die Aufgabe zukommt, Fehler des technischen Systems zu korrigieren und bei Ausfällen oder Störungen die Systemkontrolle zu übernehmen.

Im Zuge der Automatisierung erfolgt eine Verlagerung von Funktionen auf technische Systeme, die die Rolle und erforderlichen Kompetenzen des Menschen wesentlich verändert. So übernehmen in modernen Flugzeugcockpits Computersysteme (z. B. Flight-Management-System oder Autopilot) Aufgaben, die früher von der Cockpitbesatzung ausgeführt wurden. Die Anforderungen an den Piloten verschieben sich somit von aktiven manuellen Steuerungsaufgaben hin zu Tätigkeiten der Programmierung und Überwachung der Flugzeugautomation. Diese auch als leitende Kontrolle (*supervisory control*, [4]) bezeichnete Überwachungsfunktion des Menschen führte z. B. in der Luftfahrt zur Entlastung der Piloten und bedeutsamen Steigerung der Flugsicherheit [5]. Gleichzeitig haben die psychologischen Folgen der passiven Rolle des Systemüberwachers wie reduzierte Aufmerksamkeit oder Aktivierung massive Sicherheitsprobleme verursacht [6]. Bainbridge [7] spricht in diesem Zusammenhang von der „Ironie der Automatisierung“ – einerseits werden Systemfunktionen aufgrund der Fehlerhaftigkeit des Menschen automatisiert, und andererseits soll genau dieser Mensch das System überwachen und im Notfall als Rückfalloption zur Verfügung stehen.

Die aus dem Gestaltungskonzept der leitenden Kontrolle entstehenden Probleme sind in dem Forschungsgebiet „Human Factors“ umfänglich dokumentiert und werden unter dem Begriff „Out-of-the-loop-unfamiliarity“ zusammengefasst (OOTLUF, [8]). Die negativen Folgen der Entkoppelung des Menschen von der direkten Steuerung und Kontrolle beziehen sich insbesondere auf drei Aspekte, die in unterschiedlichen Anwendungskontexten identifiziert wurden: mangelndes bzw. übersteigertes Vertrauen in die Automation [9], Verlust manueller und kognitiver Fertigkeiten [10] sowie Schwierigkeiten bei der Aufrechterhaltung eines angemessenen Situations- und Systembewusstseins [11]. Unangemessenes Vertrauen kann darin resultieren, dass automatisierte Systeme nur unzureichend überwacht oder genutzt werden. Das Vertrauen in eine Automation wird von der Zuverlässigkeit, der Nachvollziehbarkeit und der wahrgenommenen Nützlichkeit beeinflusst. Die Folgen des Verlusts manueller und kognitiver Fertigkeiten werden hingegen erst dann salient, wenn der Nutzer im Falle eines Automationsfehlers plötzlich gezwungen ist, automatisierte Funktionen wieder selbst zu übernehmen. Mangelndes Training und Ausübung von Tätigkeiten kann zu Effektivitätseinbußen sowohl in motorischen als auch in kognitiven Bereichen führen. Die „Out-of-the-loop“-Effekte treten besonders hinsichtlich der Wahrnehmung und richtigen Interpretation der Systemprozesse – dem sogenannten Situationsbewusstsein – auf. Die Gründe für mangelndes Situationsbewusstsein liegen vornehmlich in der unzureichenden Überwachung des Systems, dem veränderten oder kompletten

Wegfall von Rückmeldungen (z. B. taktile Reize vom Lenkrad), der mangelnden Transparenz der Automation und dem komplexitätsbedingten mangelnden Systemverständnis. Aus kognitionspsychologischer Sicht fehlen den Menschen die entsprechenden mentalen Modelle (d. h. Wissens- und Fertigungsstrukturen), um die Funktionsweise der Automation zu verstehen [12].

Infolge der negativen Erfahrungen aus den technikzentrierten Gestaltungsansätzen kam es zu einem Umdenken in der Systemgestaltung. Unter dem Primat, den Menschen *in-the-loop* zu halten, indem Kontrollierbarkeit, Transparenz und Vorhersagbarkeit gewährleistet werden, hat sich das Konzept der menschenzentrierten Automatisierung als zentrales Gestaltungsprinzip automatisierter Systeme weitgehend durchgesetzt (vgl. z. B. [13,14]). Grundlegende Prämisse dabei ist, dass der Mensch unabhängig vom Grad der Automatisierung die letztendliche Verantwortung für das Gesamtsystem trägt. Mensch und Maschine werden in diesem Kontext metaphorisch als Kooperationspartner betrachtet [15]. Gestaltungskonzepte der adaptiven Automation denken diesen Aspekt noch weiter und weisen Funktionen zwischen Mensch und Maschine dynamisch in Abhängigkeit situativer Erfordernisse zu [16]. Umfangreiche Forschungen zu der Anwendung dieser Designstrategien haben die Vorteile, aber auch die damit verbundenen Schwierigkeiten und zukünftigen Herausforderungen verdeutlicht (vgl. z. B. [17]).

Die steigende Komplexität und Autonomie sozio-technischer Systeme stellt jedoch die Sinnhaftigkeit des Primats menschlicher Verantwortung und Kontrolle infrage und wirft gleichzeitig für bestehende Konzepte das Problem auf, die Interaktion zweier autonom entscheidender Systemelemente – Mensch und Maschine – konfliktfrei zu gestalten [18,19]. Der menschenzentrierte Gestaltungsansatz bedarf folglich einer weiterreichenden Weiterentwicklung oder Erneuerung [20], die gegebenenfalls erst durch eine breite gesellschaftliche Diskussion zu grundlegenden Fragen hinsichtlich der erwünschten Rolle der Automation im Lebensalltag beantwortet werden kann [21]. Nutzungskontexte und -häufigkeiten sowie die Kompetenzen und Expertise der Nutzer variieren jedoch über die unterschiedlichen Domänen erheblich, sodass für den Fahrzeugbereich spezifische Gestaltungskonzepte benötigt werden, die der Heterogenität der Autofahrer gerecht werden.

## 6.2.2 Automation im Auto

Auch im Fahrzeugbereich schreitet der Rollenwandel des Menschen vom aktiven Operateur hin zum passiven Überwacher des Systems immer weiter voran. Die mediale Berichterstattung zum Thema autonomes Fahren vermittelt den Eindruck, dass bereits in naher Zukunft fahrerlose Fahrzeuge die Sicherheit auf unseren Straßen verbessern werden (vgl. z. B. [22]). Obgleich bereits heute einzelne Funktionen in Fahrzeugen durch automatisierte Systeme wie z. B. den Abstandsregeltempomat übernommen werden, wird die Technologie jedoch in absehbarer Zeit nicht ohne die Verfügbarkeit des Menschen auskommen, der weiterhin Kontrollfunktionen und strategische Entscheidungen übernehmen wird [23].

Bislang ungeklärt ist die Frage, wie die Rolle des Menschen auf dem Weg hin zum vollständig autonomen Fahrzeug psychologisch sinnvoll und nutzergerecht definiert werden kann. Die oben dargestellten Erkenntnisse und Erfahrungen aus dem Bereich der Luftfahrt stellen zwar einen wichtigen Ausgangspunkt für die Beantwortung dieser Frage dar, sind jedoch aufgrund der höheren Umgebungskomplexität und -dynamik im Straßenverkehr nur bedingt für Gestaltungskonzepte im Fahrzeug nutzbar. Eine zunehmende Anzahl an Forschungsarbeiten hat sich in den letzten Jahren mit der Wechselwirkung zwischen teil- und hochautomatisierten Fahrfunktionen und dem menschlichem Verhalten beschäftigt (vgl. [24, 25]). Im Zentrum der Betrachtung stehen auch hier über unterschiedliche Automatisierungsstufen hinweg die bekannten Problembereiche der Automatisierung: Vertrauen, Kompetenzverlust und Situationsbewusstsein.

Automation ist nur dann sinnvoll, wenn Operateure dem technischen System vertrauen und es folglich auch nutzen. Die zentrale Herausforderung in der Gestaltung automatisierter Systeme ist es, angemessenes Vertrauen in diese Systeme zu erzeugen. Dabei können Fehler der Automation zum Rückgang des Vertrauens [26] führen. Dagegen kann übersteigertes Vertrauen zur Folge haben, dass die Automation nur unzureichend überwacht und kontrolliert wird (*overtrust* oder *complacency*, [27]). Der Großteil der bisherigen Forschungsarbeiten in diesem Kontext beschäftigt sich mit den Wechselwirkungen von Vertrauen im Umgang mit Adaptive Cruise Control (ACC; auf Deutsch: adaptive Geschwindigkeitsregelung). Ein gewisses Maß an Vertrauen kann dabei bereits eine wichtige Voraussetzung für die Nutzungsbereitschaft von Fahrerassistenzsystemen sein [28]. Kazi et al. [29] untersuchten in einer Längsschnittstudie im Fahr Simulator den Einfluss der Zuverlässigkeit von ACC auf das wahrgenommene Vertrauen in diese Systeme. Die Ergebnisse zeigen eine Vertrauenszunahme bei zuverlässigen Systemen im Verlauf der Zeit, die jedoch nicht im Verhältnis zur objektiven Zuverlässigkeit der Automation stand. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen Koustanaï et al. [30], die durch die systematische Graduierung des Erfahrungsstandes im Umgang mit Auffahrwarnsystemen Veränderungen im Verhalten und im Vertrauen untersuchten. Die Teilnehmergruppe mit dem höchsten Erfahrungsstand hatte im Simulator keine Unfälle und reagierte in kritischen Situationen angemessener als die Fahrer mit geringerem Erfahrungsniveau. Ebenso stand der Grad der Systemerfahrung im positiven Zusammenhang mit dem geäußerten Vertrauen, jedoch ohne die Akzeptanz der Automation zu beeinflussen. Im Kontrast zu diesen Befunden stehen die Ergebnisse mehrerer Studien, die keine signifikanten Veränderungen des Vertrauens in ACC durch wiederholte Nutzung feststellen konnten (vgl. z. B. [31, 32]). Ursachen dieser inkonsistenten Ergebnisse könnten moderierende Faktoren sein, die in jüngsten Arbeiten betrachtet wurden. Flemisch et al. [33] und Beggiano et al. [34] heben in diesem Kontext die Bedeutung übereinstimmender (bereits vorab ausgebildeter) mentaler Modelle über die Funktionsweise der jeweiligen Automation hervor. Noch einen Schritt weiter gehen Verberne et al. [35] und Waytz et al. [36]. Auf der Basis experimenteller Studien zeigen sie, dass geteilte Intentionen und Bedürfnisse zwischen Mensch und Maschine bzw. anthropomorphe Eigenschaften der Automation weitere wichtige Einflussfaktoren für die Ausbildung angemessenen Vertrauens in automatisierte Systeme darstellen können.

Das Führen eines Fahrzeugs verlangt vom Fahrer eine große Spannbreite an Kompetenzen und Fertigkeiten sowohl auf perzeptuell-motorischer Ebene (z. B. Lenken, Schalten etc.), als auch auf kognitiver Ebene (z. B. Entscheidungen treffen, Aufmerksamkeit selektiv richten etc.). Die automatisierte Ausführung dieser Aufgaben kann zum Verlust dieser Kompetenzen führen und gleichzeitig die Abhängigkeit vom technischen System erhöhen [37]. Die grundsätzliche Brisanz des Themas wird anhand einer aktuellen Pressemitteilung der Bundesluftfahrtbehörde der Vereinigten Staaten (Federal Aviation Administration, [38]) deutlich. Darin werden Piloten aufgefordert, häufiger den manuellen Flugmodus anstatt den Autopiloten zu wählen, da der Kompetenzverlust ein zunehmendes Sicherheitsrisiko für die Luftfahrt darstellt. Obgleich nach Kenntnis des Autors aktuell keine longitudinale Fehlstudien zu den Problemen des Fertigungsverlusts in (teil-)automatisierten Fahrzeugen vorliegen, „deuten die Ergebnisse erster Untersuchungen im Fahr-simulator darauf hin (z.B. [68],“ dass diese Effekte auch im Kontext der Fahrzeugautomatisierung auftreten. Adaptive oder kooperative Automatisierungskonzepte bieten die Möglichkeit, derartigen Problemen entgegenzuwirken und bis zur Realisierung vollständig autonomer Fahrzeuge wichtige Kompetenzen der Fahrer weiterhin aufrechtzuerhalten.

Der Fähigkeit, komplexe und dynamische Fahrsituationen richtig wahrzunehmen und zu interpretieren, liegt eine Reihe von kognitiven Prozessen (z. B. Aufmerksamkeit, Gedächtnis, mentale Modelle) zugrunde [12]. Monotone Überwachungsaufgaben oder die Ablenkung durch andere Tätigkeiten (z. B. Telefonieren) können dazu führen, dass diese Prozesse nicht mehr in ausreichendem Maße für das Situationsbewusstsein im Fahrzeug zur Verfügung stehen. Diese Effekte können bereits durch die Nutzung von Systemen mit niedrigem Automatisierungsgrad wie Adaptive Cruise Control (ACC) auftreten. Buld et al. [39] konnten zeigen, dass Fahrer während der Nutzung von ACC einige Aspekte der Fahraufgabe und Umgebungsbedingungen vernachlässigten und in Folge die Systemgrenzen falsch interpretierten. Verschlechterte Spurhaltung und verspätete Reaktion auf kritische Ereignisse wurden in einer Untersuchung von Ward [40] als Indikatoren reduzierten Situationsbewusstseins beim Fahren mit ACC interpretiert. Die Analysen von Ma und Kaper [41] deuten jedoch darauf hin, dass sich das Situationsbewusstsein infolge der Nutzung von ACC auch verbessern kann. Ein differenzierteres Bild dieser widersprüchlichen Ergebnisse liefern aktuelle Studien zu den Folgen hochautomatisierten Fahrens. Merat et al. [42] haben in einer Simulationsstudie die Effekte der Ausführung einer Nebenaufgabe auf das Fahrverhalten automatisierter Fahrt untersucht. Dabei zeigte sich, dass die Reaktionen auf kritische Ereignisse unter der hochautomatisierten und der manuellen Fahrbedingung ohne Nebentätigkeit vergleichbar waren. Während hingegen die Ablenkung durch Nebentätigkeiten dazu führte, dass nach der manuellen Übernahme der automatisierten Fahrt deutlich höhere Geschwindigkeiten gefahren wurden. Die Autoren führen die Ergebnisse auf das reduzierte Situationsbewusstsein zurück, das durch die nebensächlichkeitsbedingte Aufmerksamkeitsverschiebung verursacht wird.

Die hier dargestellten Problembereiche stellen nur einen Ausschnitt der zu lösenden Herausforderungen im Zusammenspiel zwischen Mensch und automatisiertem Fahrzeug dar. Viele Fragen hinsichtlich der mentalen Anpassungen und Veränderungen werden erst durch konkrete technische Umsetzung und wissenschaftliche Untersuchung der nächst

höheren Stufen der Fahrzeugautomatisierung (vgl. Automatisierungsstufen BASt, [43]) zu beantworten sein. Die Gestaltung von Schnittstellen, geeignetes Feedback oder die Vermeidung von Verantwortungsdiffusion sind Themenfelder, die bereits heute in neuen Gestaltungskonzepten adressiert werden und auf Prototypenbasis für hochautomatisierte Fahrzeuge umgesetzt wurden (vgl. z. B. [44]). Welche Lernerfahrungen, Wechselwirkungen und Veränderungen mentaler Modelle sich jedoch langfristig durch die Nutzung dieser Systeme ergeben, kann erst durch repräsentative, longitudinale Untersuchungen geklärt werden.

---

## 6.3 Mentale Modelle autonomen Fahrens

### 6.3.1 Was sind mentale Modelle?

Als mentale Modelle werden kognitiv-emotionale Repräsentationen von Objekten, Objektbeziehungen und Prozessen – kurz: innere Repräsentationen der externen Welt – bezeichnet. Der Begriff des mentalen Modells wurde erstmals von dem Psychologen Kenneth Craik [45] verwendet, der die Annahme formulierte, dass Menschen in ihrem Geist vereinfachte Modelle über die Funktionen und Abläufe ihrer Umwelt entwickeln. Die Modelle dienen der Orientierung, dem Verständnis, dem Schlussfolgern sowie der Vorhersage von Ereignissen. Craiks Ansatz der mentalen Modelle wurde später von Johnson-Laird [46] zur Beschreibung und Untersuchung von schlussfolgerndem Denken und Sprachverstehen weiterentwickelt.

In der Literatur der Kognitionspsychologie besteht weitgehend Konsens darüber (vgl. [47]), dass mentale Modelle dynamischer Natur sind und sich durch drei zentrale Eigenschaften beschreiben lassen.

1. Mentale Modelle werden im Arbeitsgedächtnis erstellt und ermöglichen Individuen, Handlungsmöglichkeiten und ihre Folgen zu simulieren [1]. Denken ist somit die Manipulation von mentalen Modellen.
2. Mentale Modelle können Ursache und Wirkungszusammenhänge repräsentieren. Sie generieren ein kausales Verständnis darüber, wie Systeme funktionieren [48].
3. Mentale Modelle können sich durch Erfahrungen im Verlauf der Zeit verändern – d. h., sie sind lernfähig.

Die Qualität der Modelle und die der darauf basierenden Schlussfolgerungen entwickeln sich durch spezifische Lernerfahrungen weiter [49]. Mit zunehmender Expertise entwickelt sich das Verständnis von Sachverhalten von konkreten hin zu abstrakten Repräsentationen – ein für die Mensch-Maschine-Interaktion relevanter Aspekt.

In den angewandten Forschungsbereichen wie der Technikgestaltung herrschen teilweise unterschiedliche Auffassungen über die Definition mentaler Modelle (vgl. [1]), die durch unterschiedliche Aufgabenkontexte erklärbar sind. Dennoch haben bereits frühere Arbeiten die Bedeutung des Konzeptes zur Vorhersage und zum Verständnis menschlichen Verhaltens im Umgang mit technischen Systemen verdeutlicht (vgl. z. B. [50]). Mentale

Modelle basieren demnach auf kontextspezifischen Erwartungen und Vorerfahrungen sowie auf der aktuellen Wahrnehmung der Systemeigenschaften. Sie stellen die Grundlage des Systemverständnisses und der Handlungsentscheidungen des Benutzers dar. Dies bedeutet, dass sowohl die fehlerfreie Nutzung als auch das Vertrauen in technische Systeme maßgeblich davon bestimmt wird, inwieweit die Funktionsweise der Maschine mit den Erwartungen der Nutzer kompatibel ist [33].

Die Kompatibilität im Kontext mentaler Modelle bezieht sich neben der Bedienbarkeit auch auf das Nutzererleben sowie die allgemeine Technikakzeptanz. Zhang und Xu [51] postulieren in diesem Zusammenhang eine Modifizierung oder Restrukturierung bestehender mentaler Modelle bei der Einführung und Nutzung neuer Technologien. Mangelnde Kompatibilität kann zur Frustration führen und beeinflusst folglich Akzeptanz- und Diffusionsraten negativ [52]. Entsprechen hingegen neue Systeme den Erwartungen (d. h. den bestehenden mentalen Modellen), hat dies gesteigertes Systemvertrauen und positives Nutzererleben zur Folge [53].

Mentale Modelle umfassen folglich Repräsentationen menschlichen Wissens, Einstellungen sowie Werte und Emotionen, die in Wechselwirkung mit ihrer Umwelt stehen. Im Themenfeld der Automatisierung von Fahrzeugen sind sowohl die kognitionspsychologischen Prozesse der Informationsverarbeitung als auch der Einfluss höherer mentaler Strukturen (z. B. Bedürfnisse, Erwartungen, Wünsche etc.) von Bedeutung. Die Interdependenz dieser unterschiedlichen Ebenen wurde bereits in theoretischen Modellen über die Rolle des Fahrers in automatisierten Fahrzeugen verdeutlicht (vgl. z. B. [54, 55]). Letztendlich wird die geeignete Modifikation und Anpassung der mentalen Modelle den Umgang mit automatisierten Fahrzeugen, die Nutzungshäufigkeit sowie die Akzeptanz dieser Systeme maßgeblich bestimmen. Der erfolgreiche – noch zu definierende – Rollenwandel des Fahrers im automatisierten Fahrzeug bedarf somit einer integrativen Betrachtung der vorliegenden Ergebnisse zu menschlichem Verhalten in teil- und hochautomatisierten Systemen sowie der aktuellen Vorstellungen und Bedürfnisse gegenüber vollautomatisierten Fahrzeugen. Oder anders gesagt, menschenzentrierte Technikgestaltung impliziert nicht nur die Betrachtung der technischen Möglichkeiten und Grenzen, sondern auch die Orientierung an individuellen und gesellschaftlichen Wertevorstellungen und Zielen.

### 6.3.2 Onlineumfrage

Für viele Menschen sind autonome Fahrzeuge noch eine ferne Zukunftsvision. Auch wenn sich manche bereits vorgestellt haben mögen, wie attraktiv es wäre, während der Autofahrt zu schlafen oder Zeitung zu lesen, ist das Wissen über autonome Fahrzeuge in der breiten Bevölkerung noch begrenzt. Entscheidungen über die Nutzung und Akzeptanz von Innovationen basieren jedoch nicht ausschließlich auf rationalem Wissen [56]. Entgegen dem Menschenbild des rationalen, nutzenmaximierenden Entscheiders – dem *homo oeconomicus* – bedienen sich Menschen vielmehr einfacher Entscheidungsstrategien, welche die zu verarbeitende Informationsmenge reduzieren und von emotionalen Prozessen beein-

flusst werden [57, 58, 59]. Einstellungen und Entscheidungen sind nicht beliebig durch die Bereitstellungen von Informationen veränderbar. Vielmehr werden neue Informationen selektiv aufgenommen und verarbeitet, sodass sie im Einklang mit den bestehenden Wünschen, Erwartungen und Zielen – den mentalen Modellen der Menschen – stehen [60]. Für den Erfolg einer Innovation ist es folglich entscheidend, dass nicht nur deren kognitive Wahrnehmungen und Bewertungen in bestehende mentale Modelle integrierbar, sondern auch emotional anschlussfähig sind [61, 62].

Neben einer Vielzahl von Studien zu den technischen, rechtlichen und kognitiven Aspekten der Automatisierung von Fahrzeugen existieren bislang nur wenige Untersuchungen, die sich mit den Präferenzen und Erwartungen potenzieller Nutzer auseinandersetzen. In der bislang größten repräsentativen internationalen Erhebung zu dem Thema [63] standen insbesondere die Akzeptanz und Nutzungsbereitschaft automatisierter Fahrzeuge im Fokus des Interesses. Die Ergebnisse zeigen für Deutschland, dass automatisierte Fahrzeuge mehrheitlich als nützlicher technischer Fortschritt erachtet werden. Dagegen äußert gleichzeitig die Hälfte der Teilnehmer Angst gegenüber dem automatisierten Fahren und bezweifelt, dass die Technologie zuverlässig funktionieren wird. Im Vergleich mehrerer Nutzungsszenarien werden insbesondere lange Autobahnfahrten als bevorzugte Einsatzmöglichkeit des autonomen Fahrens genannt. Interessanterweise finden die Autoren einen positiven Zusammenhang zwischen der Akzeptanz von Fahrerassistenzsystemen und der Akzeptanz gegenüber dem automatisierten Fahren. Eine mögliche Erklärung dafür könnte sein, dass die Ausbildung geeigneter mentaler Modelle zu den Eigenschaften teilautomatisierter Systeme auch das Akzeptanzniveau für höhere Automatisierungsstufen positiv beeinflussen (vgl. [34]).

Welche Einstellungen sowie kognitiven und emotionalen Repräsentationen der Akzeptanz oder Ablehnung automatisierter Fahrzeuge zugrunde liegen, ist bislang unbekannt. In Ergänzung zu den oben dargelegten kognitionspsychologischen Anforderungen an die Gestaltung der Mensch-Maschine-Interaktion stellen diese jedoch eine wichtige Voraussetzung für das Gelingen der Transformation im Verkehrssektor dar. Ziel der hier dargestellten repräsentativen Onlinefragebogenstudie war es, ein differenziertes, teilweise exploratives Bild der Wahrnehmungen des autonomen Fahrens über die in dem Projekt entwickelten Use-Cases hinweg zu generieren. Der Fragebogen wurde unter den folgenden Leitfragen entwickelt:

- „Mit welchen mentalen Modellen begegnen potenzielle Nutzer der neuen Rolle des Fahrers im autonomen Fahrzeug?“
- „Welche automatisierten Elemente der Fahrzeugsteuerung sind am ehesten an die mentalen Modelle der Nutzer anschlussfähig?“
- „Welche Kontrollfunktionen und Interventionsmöglichkeiten des Fahrers erwarten potenzielle Nutzer im autonomen Fahrzeug bzw. können die Akzeptanz des Innovationsfeldes steigern?“
- „Welche Erlebnis- und Gestaltungselemente in automatisierten Fahrzeugen können bisherige Repräsentationen zur Rolle des Fahrers substituieren und somit die Akzeptanz des Innovationsfeldes steigern?“



### 6.3.3 Methoden

#### 6.3.3.1 Fragebogen

Der Fragebogen wurde in Zusammenarbeit mit weiteren Autorinnen dieses Buches (Rita Cyganski, s. Kap. 12 sowie Eva Fraedrich und Barbara Lenz, s. Kap. 29) konzipiert. Die Erhebung erfolgte internetbasiert im April 2014 über einen elektronischen Fragebogen. Der Fragebogen war in zwei Hauptabschnitte unterteilt:

1. Allgemeiner Teil: Dieser Bereich bestand aus fünf Fragengruppen, die Fragen zur Soziodemografie, zu den Vorkenntnissen, dem Interesse und der allgemeinen Akzeptanz automatisierten Fahrens, zu bedürfnisbezogenen Einstellungen bezüglich unterschiedlicher Verkehrsmittel, zu den emotionalen Repräsentationen mobilitätsbezogener Begriffe sowie den Themen der Zeitnutzung und zur allgemeinen Verkehrsmittelnutzung umfassen.
2. Spezieller Teil: Die Fragen in diesem Teil bezogen sich auf die im Projekt entwickelten vier Nutzungsszenarien (sogenannte Use-Cases, s. Kap. 2) und waren jeweils in folgende zehn Themengruppen unterteilt: freie Assoziationen zu dem Nutzungsszenario, Nutzungsbereitschaft, antizipierter Wegzweck, antizipierter Einfluss auf bisherige Verkehrsmittelnutzung, angenommene Bedürfniserfüllung, emotionale Reaktionen, Vertrauen und Akzeptanz, Kontroll- und Interventionsbedürfnisse sowie bevorzugte Nebenaufgaben während der automatisierten Fahrt.

Zur Reduzierung der Bearbeitungszeit wurden die Fragen zu den vier unterschiedlichen Use-Cases (s. unten 6.3.2.2–6.3.2.4) im zweiten Teil nicht von jedem Teilnehmer beantwortet. Nach der Beantwortung der Fragen im ersten Teil wurde das Sample gesplittet und die Studienteilnehmer zufällig und zu gleichen Teilen (jeweils  $n = 250$ ) einem der vier Nutzungsszenarien zugewiesen. Insgesamt umfasste der Fragebogen 438 Items, wobei durch die Aufteilung der Use-Cases von jedem Teilnehmer 210 Fragen beantwortet wurden. Die Items wurden zum Teil aus früheren Mobilitätserhebungen [62, 64] übernommen bzw. neu entwickelt und – insbesondere die Fragen des zweiten Teils – in einem Pretest auf Verständlichkeit geprüft.

Bei allen Einstellungsfragen wurde der Grad der Zustimmung über eine sechsstufige Skala (1 = *trifft überhaupt nicht zu*, 6 = *trifft voll und ganz zu*; bei einigen Fragen weichen diese Codes aus inhaltlichen Gründen ab) erfasst. Die affektive Bedeutung der Begriffe im Themenfeld Mobilität wurde mit der Methode des semantischen Differenzials erhoben [65]. In den drei Dimensionen Valenz, Potenz und Erregung wurden dazu jeweils bipolare, neunstufige (von -4 = *äußerst* über 0 = *neutral* bis zu 4 = *äußerst*) Skalen verwendet, die an den Endpunkten mit den Adjektiven *unangenehm* – *angenehm* (Valenz), *schwach* – *mächtig* (Potenz) und *beruhigend* – *aufregend* (Erregung) gekennzeichnet waren. Das aktuelle Verkehrsverhalten wurde über Auswahloptionen bzw. Häufigkeitskategorien erfasst.

### 6.3.3.2 Stichprobe

Die Teilnehmer der Befragung wurden über ein kommerzielles Marktforschungspanel der Firma Respondi AG rekrutiert (<http://www.respondi.com/de/>) und von dieser für ihr Mitwirken finanziell entlohnt. Von dem Unternehmen wurde eine für die gesamtdeutsche Bevölkerung repräsentative Zusammensetzung hinsichtlich Alter, Geschlecht, Bildung und Einkommen zugesichert. Insgesamt haben  $n = 1363$  Personen den Fragebogen vollständig ausgefüllt. Einige Personen beantworteten die Fragen jedoch in so kurzer Zeit, dass ihre Gewissenhaftigkeit in Zweifel gezogen werden muss. Folglich wurden die Daten all jener Teilnehmer, deren Bearbeitungszeit unter 1000 Sekunden lag, in den weiteren Analysen nicht weiter berücksichtigt. Das Sample reduzierte sich somit um  $n = 230$  auf  $n = 1133$ . In einem weiteren Schritt wurden infolge der sich daraus ergebenden Quotenverzerrung  $n = 133$  weibliche Personen zufällig aus den Datensatz entfernt, um eine annähernd repräsentative Verteilung zumindest in der Geschlechterquote zu erreichen. Die mittlere Bearbeitungszeit der verbleibenden Stichprobe ( $n = 1000$ ) lag bei 1897 Sekunden (= 31,6 Minuten) (SD = 780 Sekunden). Tabelle 6.1 ist die genaue demografische Zusammensetzung des Samples zu entnehmen.

### 6.3.3.3 Datenanalyse affektive Ähnlichkeit

Die affektive Ähnlichkeit zwischen den mittels semantischen Differenzials bewerteten Begrifflichkeiten wurde durch die dreidimensionale euklidische Distanz zwischen dem gemittelten EPA-Profil (E = Valenz, P = Potenz, A = Erregung) des Begriffes „Ideale Fahrt“ und den gemittelten EPA-Profilen der übrigen Begriffe in folgender Weise berechnet:

$$d = \sqrt{(I_e - B_e)^2 + (I_p - B_p)^2 + (I_a - B_a)^2},$$

wobei  $I$  die Bewertung der „Idealen Fahrt“ bezeichnet,  $B$  die jeweilige Bewertung der übrigen Begriffe und die tiefgestellten Buchstaben die EPA-Dimensionen festlegen.

### 6.3.4 Ergebnisse

Zunächst interessierte, inwieweit das Thema „Autonomes Fahren“ in der Bevölkerung überhaupt bekannt ist, ob es auf breites Interesse stößt und wie die Technologie spontan beurteilt wird. Weniger als die Hälfte der Befragten (44 Prozent) gab an, keine Kenntnisse von dem Thema zu haben, während die Mehrheit bereits von dem Thema gehört (33 Prozent), darüber gelesen hat (16 Prozent) oder nach eigenen Angaben über ein höheres Kompetenzniveau (4 Prozent) verfügt. Eine ähnliche Verteilung zeigt sich auch hinsichtlich des Interesses am Thema „Autonomes Fahren“. Die Teilnehmer äußerten mehrheitlich (58 Prozent) „leichtes“, „überwiegendes“ oder „starkes“ Interesse an dem Thema, während jedoch die Mehrheit (56 Prozent) sich grundsätzlich nicht vorstellen kann, das eigene bislang bevorzugte Verkehrsmittel durch ein autonomes Fahrzeug zu ersetzen. Trotz überwiegenden Interesses und einiger Vorkenntnisse besteht also bei einem Großteil der Be-

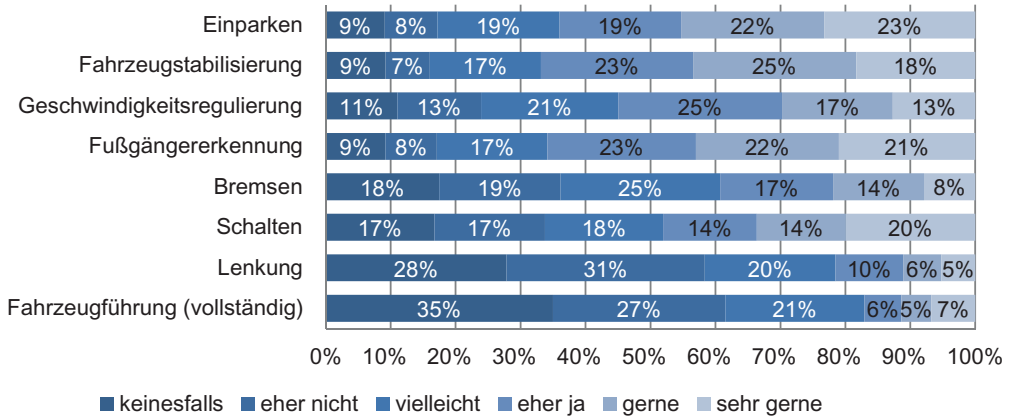
**Tab. 6.1** Demografische und mobilitätsspezifische Merkmale der Stichprobe

Merkmale		
<i>Demografie</i>		
<b>Geschlecht</b>	weiblich	55,5%
<b>Alter</b>	18–29 Jahre	8,8%
	30–49 Jahre	33,6%
	50–64 Jahre	31,7%
	65 + Jahre	25,9%
<b>Bildung</b>	keine Schulausbildung	1,1%
	Volks-/Hauptschulabschluss	39,4%
	Mittlere Reife/Realschulabschluss	29,5%
	Abitur oder Fachhochschulreife	30,0%
<b>Einkommen</b>	unter 900 Euro pro Monat	6,6%
	900 bis unter 1500 Euro pro Monat	17,5%
	1500 bis unter 2000 Euro pro Monat	15,2%
	2000 bis unter 2600 Euro pro Monat	14,4%
	2600 bis unter 3600 Euro pro Monat	18,6%
	mehr als 3600 Euro pro Monat	27,7%
<i>Mobilität</i>		
<b>Führerschein</b>	ja	89,8%
<b>PKW-Anzahl im Haushalt</b>	kein Auto	12,6%
	1 Auto	51,8%
	2 Autos	28,8%
	3 und mehr Autos	6,8%
<b>Täglich genutztes Verkehrsmittel</b>	Auto	55,0%
	öffentlicher Nahverkehr	13,7%
	Carsharing	0,4%
	Fahrrad	10,7%

völkerung eine gewisse Zurückhaltung hinsichtlich der Nutzungsbereitschaft autonomer Fahrzeuge.

#### 6.3.4.1 Fahrerassistenzsysteme und Abgabe von Fahraufgaben

Wie bereits oben dargestellt, kann die Nutzung und Akzeptanz von Fahrerassistenzsystemen einen positiven Effekt auf die generelle Wahrnehmung des autonomen Fahrens haben. Die Ergebnisse der vorliegenden Studie zeigen, dass ein Großteil der Befragten (67 Prozent) bereits von Fahrerassistenzsystemen gehört hat. Unter den Personen, die im



**Abb. 6.1** Bedürfnis der Funktionsabgabe an ein automatisiertes System

Alltag einen Pkw nutzen (82 Prozent), wird am häufigsten der Tempomat (50 Prozent), die akustische Einparkhilfe (46 Prozent) und der Fernlichtassistent (22 Prozent) eingesetzt. Die übrigen Systeme wie Abstandsregeltempomat (ACC, 15 Prozent), Nachtsichtassistent (11 Prozent), Head-up-Display (10 Prozent) oder Müdigkeitsassistent (8 Prozent) werden nur von einer Minderheit im Alltag genutzt.

Die Bedürfnisse, bestimmte Fahraufgaben und -funktionen an ein automatisiertes System abzugeben, weisen ein ähnliches Bild auf. Abbildung 6.1 zeigt die aufgabenspezifische Verteilung der Bedürfnisse in dem Kategorienspektrum von „keinesfalls“ bis „sehr gerne“. Im Vergleich der unterschiedlichen Fahraufgaben wird deutlich, dass neben der überwiegenden Ablehnung (62 Prozent in den Kategorien „keinesfalls“ und „eher nicht“), die vollständige Fahrzeugführung an einen Fahrroboter abzugeben, insbesondere die Lenkung des Fahrzeugs (58,3 Prozent in den Kategorien „keinesfalls“ und „eher nicht“), ungern an ein automatisiertes System delegiert wird. Während die Übertragung von Einparkaufgaben (45 Prozent in den Kategorien „gerne“ und „sehr gerne“) sowie sicherheitsrelevanter Assistenzen im Bereich der Fahrzeugstabilisierung (43 Prozent in den Kategorien „gerne“ und „sehr gerne“) und der Fußgängererkennung (43 Prozent in den Kategorien „gerne“ und „sehr gerne“) präferiert werden.

#### 6.3.4.2 Repräsentationen der Fahrerrolle und Nutzungsszenarien

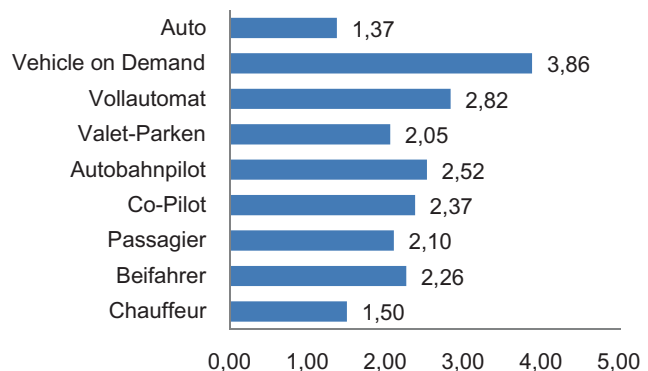
Auf der Basis des semantischen Differenzials wurden unter allen Teilnehmern die affektiven Bedeutungen unterschiedlicher Begriffe, die sich einerseits auf unterschiedliche Rollen im Fahrzeug und andererseits auf die in den Use-Cases beschriebenen Nutzungsszenarien beziehen, erhoben. Außerdem wurde der Begriff der „Idealen Fahrt“ und das konventionelle „Auto“ in dieser Art bewertet. Die Rohergebnisse (durchschnittliche Bewertungen auf den Skalen Valenz, Potenz und Aktivierung) sind in Tab. 6.2 dargestellt.

Die Ergebnisse wurden genutzt, um die euklidischen Distanzen und somit deren affektive Ähnlichkeit zwischen dem Begriff der „Idealen Fahrt“ und den übrigen Begriffen zu

**Tab. 6.2** Arithmetisches Mittel ( $M$ ) der affektiven Bewertungen

Begriff	Valenz	Potenz	Erregung
<i>Chauffeur</i>	1,26	0,80	-0,05
<i>Beifahrer</i>	0,89	-0,06	0,07
<i>Passagier</i>	0,95	0,15	0,10
<i>Co-Pilot</i>	0,61	0,34	0,37
<i>Fahrzeug mit Autobahn-pilot</i>	0,54	0,68	0,86
<i>Fahrzeug mit Valet-Parken</i>	0,93	0,89	0,68
<i>Vollautomatisiertes Fahrzeug</i>	0,26	0,68	1,00
<i>Vehicle-on-Demand</i>	-0,69	-0,05	1,04
<i>Auto</i>	2,23	1,65	0,85
<i>Ideale Fahrt</i>	2,69	1,30	-0,42

berechnen (für methodische Details (s. [61, 66])). Eine Visualisierung dieser Berechnungen bietet Abb. 6.2, in der auf der x-Achse die euklidische Distanz der bewerteten Begriffe abgebildet ist. Niedrige Werte indizieren eine geringere Distanz und somit höhere affektive Ähnlichkeit zwischen den Begriffen, d. h., sie lösen eine stärkere positive Assoziation bei den Befragten aus. Deutlich erkennbar ist, dass der „Chauffeur“ der „Idealen Fahrt“ affektiv am nächsten kommt, wobei der „Co-Pilot“ am wenigsten dieser emotionalen Repräsentation entspricht. Im Vergleich der unterschiedlichen Use-Cases des autonomen Fahrens wird sichtbar, dass das Vehicle-on-Demand deutlich von den Empfindungen für eine ideale Fahrt abweicht, wohingegen Fahrzeuge mit Valet-Parken am ehesten damit assoziiert sind. Die im Vergleich zu den Use-Cases deutlich positivere affektive Verankerung konventioneller Autos kann folglich ein wesentliches Akzeptanzhemmnis für die Einführung insbesondere vollautomatisierter Fahrzeuge darstellen. In Bezug auf die Rolle des Fahrers unterstreichen die gefundenen affektiven Repräsentationen die in einer weiteren Frage explizit adressierte Rollenpräferenz. Die Teilnehmer gaben bei diesem Item mittels Schie-

**Abb. 6.2** Euklidische Distanzen zur affektiven Repräsentation der „Idealen Fahrt“

beregler (1 = Passagier und 10 = Überwacher) an, welche Rolle sie im autonomen Fahrzeug einnehmen wollen. Der arithmetische Mittelwert von 6,36 (SD = 2,9) vermittelt eine Präferenz für die Rolle des aktiven Überwachers, dem fortwährend die Kontrolle des Fahrzeugs auf der Basis von stetig verfügbaren Systeminformationen ermöglicht wird. Die Rolle des passiven Passagiers ist auch auf affektiver Ebene ( $d = 2,1$ ) noch sichtbar vom erwünschten Ideal ( $d = 0$ ) entfernt.

#### 6.3.4.3 Kognitive und emotionale Repräsentationen der Nutzungsszenarien

Wie oben beschrieben, wurde die Gesamtstichprobe in diesem Teil des Fragebogens zufallsbasiert in vier gleich große Untergruppen (jeweils  $n = 250$ ) aufgeteilt und einem der vier Nutzungsszenarien (autonome Fahrzeuge mit Autobahnпилот mit Verfügbarkeitsfahrer (1), mit Valet-Parken (2), vollautomatisierte Fahrzeuge mit Verfügbarkeitsfahrer (2) und Vehicle-on-Demand (4)) zugewiesen. Dies ermöglichte einen Intergruppenvergleich der Erwartungen und Einstellungen gegenüber den einzelnen Szenarien. Zu Beginn dieses Abschnitts wurden die Teilnehmer nach der Nutzungsbereitschaft der jeweils kurz beschriebenen Varianten des autonomen Fahrens gefragt. Autonome Fahrzeuge mit Valet-Parken finden die meiste Zustimmung (53 Prozent), gefolgt von vollautomatisierten Fahrzeugen mit Verfügbarkeitsfahrer (45 Prozent) und Fahrzeugen mit Autobahnпилот (42 Prozent). Die geringste Nutzungsabsicht wurde gegenüber dem Vehicle-on-Demand geäußert (35 Prozent). Die Unterschiede sind gemäß der durchgeführten einfaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) statistisch bedeutsam ( $F(3,996) = 4,528; p < .01$ ). Der Bonferroni-Post-hoc-Test (paarweiser Mittelwertvergleich) zeigt jedoch an, dass sich lediglich die Use-Cases Valet-Parken und Vehicle-on-Demand in der Nutzungsabsicht signifikant unterscheiden ( $p < .01$ ).

Auf die Frage, in welchem Umfang diverse Mobilitätsbedürfnisse durch die Nutzung eines autonomen Fahrzeugs erfüllt werden würden, zeigen sich teilweise unterschiedliche Einschätzungen im Vergleich der Szenarien. In Tab. 6.3 sind die Mittelwerte dieser Beurteilungen und statistische Resultate (ANOVA und Bonferroni-Post-hoc-Test) gegenübergestellt. In der Gesamtbetrachtung zeigt sich, dass autonome Fahrzeuge als komfortabel, stressfrei und umweltfreundlich wahrgenommen werden. Statistisch relevante Unterschiede im Vergleich der Use-Cases bestehen in puncto Stressfreiheit, Komfort, Sicherheit und Zeitersparnis. Valet-Parken adressiert dabei nach Einschätzung der Befragten die Bedürfnisse nach Zeitersparnis, Komfort, Stressfreiheit am effektivsten und erklärt somit die hohen Akzeptanzraten in dieser Variante autonomen Fahrens. Kritisch hervorzuheben sind die Sicherheitsbedenken beim Nutzungsszenario Vehicle-on-Demand.

Die emotionale Bewertung der Use-Cases erfolgte hinsichtlich zehn unterschiedlicher Emotionen (Hoffnung, Gelassenheit, Zufriedenheit, Freude, Besorgnis, Ärger, Stress, Machtlosigkeit, Abneigung, Angst). Die Teilnehmer waren dabei aufgefordert anzugeben, welche Emotionen sie bei der antizipierten Nutzung der jeweiligen Variante autonomen Fahrens empfinden. Die Ergebnisse (s. Tab. 6.4) bestätigen die Tendenzen der oben dargestellten Unterschiede im Vergleich der Use-Cases. Mit dem Valet-Parken sind die stärk-

**Tab. 6.3** Arithmetisches Mittel ( $M$ ) und Standardabweichung ( $SD$ ) der Bedürfniserfüllung

	Auto- bahn-pilot	Valet-Parken	Vollautomat	Vehicle- on-Demand	
Mobilitätsbedürfnis	M (SD)	M (SD)	M (SD)	M (SD)	F(3,996)
<i>Unabhängigkeit</i>	3,39 (1,44)	3,70 <sub>4</sub> (1,46)	3,53 (1,47)	3,32 <sub>2</sub> (1,57)	3,286*
<i>Stressfreiheit</i>	3,72 <sub>2</sub> (1,55)	4,13 <sub>1,4</sub> (1,43)	3,93 (1,50)	3,67 <sub>4</sub> (1,79)	4,509**
<i>Komfort</i>	3,78 (1,42)	4,12 <sub>4</sub> (1,39)	4,06 <sub>4</sub> (1,38)	3,63 <sub>2,3</sub> (1,58)	6,364**
<i>Niedrige Kosten</i>	3,45 (1,30)	3,35 (1,31)	3,24 (1,38)	3,55 (1,52)	2,336
<i>Umweltfreundlichkeit</i>	3,71 (1,30)	3,79 (1,29)	3,81 (1,32)	3,78 (1,50)	0,253
<i>Sicherheit</i>	3,48 (1,48)	3,55 (1,30)	3,66 <sub>4</sub> (1,48)	1,22 <sub>3</sub> (1,64)	4,014**
<i>Soziales Ansehen</i>	2,86 (1,39)	2,87 (1,35)	2,97 (1,38)	2,87 (1,49)	0,354
<i>Fahrerlebnis</i>	3,24 (1,43)	3,39 <sub>4</sub> (1,34)	3,28 (1,42)	3,01 <sub>4</sub> (1,57)	3,029*
<i>Geringer Zeitaufwand</i>	3,40 <sub>2</sub> (1,37)	4,00 <sub>1,3,4</sub> (1,40)	3,43 <sub>2</sub> (1,39)	3,36 <sub>2</sub> (1,52)	11,534**

*Bemerkung: Die durch tiefer gestellte Zahlen markierten Mittelwerte weisen einen signifikanten Unterschied im Bonferroni-Post-hoc-Test (paarweiser Mittelwertvergleich) auf einem Niveau von  $p = .05$  auf (z. B. tiefer gestellte 2 in der zweiten Zeile/ ersten Spalte indiziert einen signifikanten Unterschied zu dem entsprechenden Wert der zweiten Spalte)*

*\* $p < .05$ ; \*\* $p < .01$*

ten positiven emotionalen Assoziationen verbunden. Die Gefühle Zufriedenheit, Gelassenheit und Freude sind signifikant stärker ausgeprägt als in den übrigen Szenarien. In den Szenarien Autobahn-pilot, vollautomatisiertes Fahrzeug und Vehicle-on-Demand überwiegen die Empfindungen der Machtlosigkeit und der Angst. Das Gefühl, ausgeliefert zu sein, geht mit diesen Emotionen einher und stellt ein starkes Akzeptanzhindernis dar. Neben dem Valet-Parken evoziert lediglich das vollautomatisierte Fahrzeug überdurchschnittlich positive Emotionen wie Freude, Hoffnung und Zufriedenheit, obgleich die negativen Empfindungen in diesem Szenario überwiegen.

Diese Ergebnisse liefern ein differenziertes Bild der emotionalen Grundlagen, welche die wohl wichtigste Emotion im Kontext der Automatisierung konstituieren – das Vertrauen. Das Vertrauen in die beschriebenen Varianten des autonomen Fahrens wurde in dieser Befragung anhand von vier Items (z. B. „Ich kann mir vorstellen, mich in meiner Alltagsmobilität auf ein derartiges System zu verlassen“) gemessen – analog zu den übrigen Einstellungsisems auf einer sechsstufigen Likert-Skala. Aus diesen Items wurde ein Summenindex gebildet. Wie nicht anders zu erwarten, ist das Vertrauen in Fahrzeuge mit Valet-Parken ( $M = 3,45$ ;  $SD = 1,31$ ) am höchsten und gegenüber dem Vehicle-on-Demand am schwächsten ausgeprägt ( $M = 3,10$ ;  $SD = 1,42$ ). Der Vertrauen in Fahrzeuge mit Autobahn-pilot und in vollautomatisierte Fahrzeuge befindet sich auf annähernd gleichem Niveau ( $M = 3,36$ ;  $SD = 1,33$  zu  $M = 3,28$ ;  $SD = 1,33$ ). Statistisch bedeutsam sind lediglich die Unterschiede zwischen dem Szenario Valet-Parken und Vehicle-on-Demand (Bonferroni-Post-hoc-Test,  $p < .05$ ).

**Tab. 6.4** Arithmetisches Mittel ( $M$ ) und Standardabweichung ( $SD$ ) der emotionalen Empfindungen

	Auto- bahnpilot	Valet-Parken	Vollautomat	Vehicle- on-Demand	
<i>Emotion</i>	M (SD)	M (SD)	M (SD)	M (SD)	F(3,996)
<i>Hoffnung</i>	3,04 (1,30)	3,16 (1,35)	3,23 (1,32)	3,00 (1,39)	1,504
<i>Gelassenheit</i>	3,12 (1,45)	3,44 <sub>4</sub> (1,40)	3,22 (1,33)	3,06 <sub>2</sub> (1,49)	3,482**
<i>Zufriedenheit</i>	3,25 (1,44)	3,52 <sub>4</sub> (1,48)	3,35 (1,33)	3,09 <sub>2</sub> (1,49)	4,024**
<i>Freude</i>	3,07 (1,44)	3,43 <sub>4</sub> (1,42)	3,30 (1,33)	3,06 <sub>2</sub> (1,44)	4,135**
<i>Besorgnis</i>	3,50 <sub>2</sub> (1,47)	2,97 <sub>1,3,4</sub> (1,49)	3,54 <sub>2</sub> (1,43)	3,52 <sub>2</sub> (1,63)	8,474**
<i>Ärger</i>	2,66 (1,34)	2,49 (1,37)	2,75 (1,34)	2,79 (1,45)	2,371
<i>Stress</i>	3,04 <sub>2</sub> (1,52)	2,57 <sub>1,3,4</sub> (1,36)	3,10 <sub>2</sub> (1,43)	3,04 <sub>2</sub> (1,59)	7,028**
<i>Machtlosigkeit</i>	3,72 <sub>2</sub> (1,59)	3,04 <sub>1,3,4</sub> (1,51)	3,63 <sub>2</sub> (1,45)	3,82 <sub>2</sub> (1,67)	12,770**
<i>Abneigung</i>	3,23 <sub>2</sub> (1,61)	2,75 <sub>1,3,4</sub> (1,55)	3,27 <sub>2</sub> (1,55)	3,35 <sub>2</sub> (1,72)	7,075**
<i>Angst</i>	3,39 <sub>2</sub> (1,57)	2,68 <sub>1,3,4</sub> (1,40)	3,24 <sub>2</sub> (1,43)	3,37 <sub>2</sub> (1,65)	12,075**

*Bemerkung: Die durch tiefergestellte Zahlen markierten Mittelwerte weisen einen signifikanten Unterschied im Bonferroni-Post-hoc-Test (paarweiser Mittelwertvergleich) auf einem Niveau von  $p = .05$  auf (z. B. tiefergestellte 4 in der zweiten Zeile/ zweiten Spalte indiziert einen signifikanten Unterschied zu dem entsprechenden Wert der vierten Spalte).*

*\* $p < .05$ ; \*\* $p < .01$*

#### 6.3.4.4 Interventions-, Kontroll- und Erlebnisbedürfnisse

Für die deutliche Mehrheit der befragten Personen (Autobahnpilot: 82 Prozent; Valet Parken: 81 Prozent; vollautomatisiertes Fahrzeug: 88 Prozent; Vehicle-on-Demand: 84 Prozent) ist die Möglichkeit, jederzeit die manuelle Kontrolle über das Fahrzeug wieder übernehmen bzw. den automatisierten Fahrvorgang abbrechen zu können, eines der zentralen Bedürfnisse. Gleichzeitig will nur eine Minderheit in den Szenarien mit Verfügbarkeitsfahrer (Autobahnpilot: 32 Prozent; vollautomatisiertes Fahrzeug: 48 Prozent) die Aufmerksamkeit nicht mehr auf den Verkehr richten und dem automatisierten System vollständig die Fahrzeugkontrolle überlassen. Dies spiegelt sich auch in dem für diese beiden Use-Cases mehrheitlich geäußerten Bedürfnis wider, die im Fahrzeug übliche Sitzposition während der automatisierten Fahrt nicht verlassen zu wollen (Autobahnpilot: 76 Prozent; vollautomatisiertes Fahrzeug: 79 Prozent). In allen vier Szenarien formuliert die überwiegende Anzahl der Teilnehmer den Wunsch, die Automation gemäß der eigenen Präferenzen hinsichtlich Fahrstil (z. B. komfortabel vs. sportlich) oder Streckenauswahl (z. B. zeiteffizient vs. umweltfreundlich) anpassen zu können (Autobahnpilot: 71 Prozent; Valet-Parken: 76 Prozent; vollautomatisiertes Fahrzeug: 72 Prozent; Vehicle-on-Demand: 82 Prozent).

Als wichtigster Vorteil der Nutzung autonomer Fahrzeuge wird die Möglichkeit erachtet, während der Fahrt die Landschaft genießen zu können (Autobahnpilot: 64 Prozent; vollautomatisiertes Fahrzeug: 72 Prozent; Vehicle-on-Demand: 72 Prozent; Valet-Parken: o. A.). Weiterhin wird die Option, sich ungestört mit den Fahrzeuginsassen unterhalten zu können,



als sehr positiv wahrgenommen (Autobahnpilot: 63 Prozent; vollautomatisiertes Fahrzeug: 65 Prozent; Vehicle-on-Demand: 68 Prozent; Valet-Parken: o. A.). Erstaunlicherweise werden Tätigkeiten wie Internetsurfen (Autobahnpilot: 28 Prozent; vollautomatisiertes Fahrzeug: 39 Prozent; Vehicle-on-Demand: 46 Prozent; Valet-Parken: o. A.), Filme ansehen (Autobahnpilot: 23 Prozent; vollautomatisiertes Fahrzeug: 32 Prozent; Vehicle-on-Demand: 36 Prozent; Valet-Parken: o. A.), Arbeiten (Autobahnpilot: 22 Prozent; vollautomatisiertes Fahrzeug: 33 Prozent; Vehicle-on-Demand: 36,4 Prozent; Valet-Parken: o. A.) oder Entspannen bzw. Schlafen (Autobahnpilot: 31 Prozent; vollautomatisiertes Fahrzeug: 47 Prozent; Vehicle-on-Demand: 54 Prozent; Valet-Parken: o. A.) nur von einer Minderheit als positiver Aspekt des automatisierten Fahrens betrachtet. Als wichtigste Vorteile des Valet-Parkens werden die Entlastung bei der Parkplatzsuche (80 Prozent), die Sicherheit des Parkortes (78 Prozent), die entstehende frei verfügbare Zeit (76 Prozent) sowie die günstigeren Parkplatzooptionen außerhalb der Innenstädte wahrgenommen (76 Prozent).

---

## 6.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Die Interaktion zwischen Mensch und autonomem Fahrzeug stand im vorliegenden Beitrag im Fokus des Interesses. Vor dem Hintergrund der Annahme, dass automatisierte Fahrzeuge in absehbarer Zukunft immer noch auf die Verfügbarkeit und Kontrolle des Menschen angewiesen sein werden, wurden zunächst die kognitionspsychologischen Auswirkungen der Mensch-Maschine-Interaktion betrachtet. Im Weiteren wurde im Rahmen einer umfangreichen Onlinebefragung die Nutzerperspektive des autonomen Fahrens empirisch untersucht. Das besondere Augenmerk galt dabei den Einstellungen, Erwartungen und Emotionen – den mentalen Modellen – gegenüber dem Thema des autonomen Fahrens.

Aus den Forschungsergebnissen zu den psychologischen Folgen der Automatisierung in unterschiedlichen Domänen (z. B. Luftfahrt, Produktion) ist zu schließen, dass der Mensch auf dem Weg zum vollautomatisierten Fahrzeug noch stärker ins Zentrum der Aufmerksamkeit von Gestaltern und Entwicklern rücken muss. Bereits bei den heute verfügbaren teilautomatisierten Systemen zeigen sich bei Fahrern bekannte Probleme wie unangemessenes Vertrauen und reduziertes Situationsbewusstsein. Welche Auswirkungen höhere Automatisierungsgrade und die damit verbundene, länger währende mentale Entkoppelung langfristig auf die kognitiven und motorischen Fähigkeiten des Fahrers haben werden, ist noch weitestgehend unbekannt. Die diesbezüglich festgestellten Effekte bei hochtrainierten und erfahrenen Flugzeugpiloten sind jedoch alarmierend [38]. Training und die regelmäßige manuelle Ausführung automatisierbarer Fahrtätigkeiten scheinen somit ein wichtiges Instrument zu sein, um die benötigten und erwünschten Kompetenzen der Fahrer aufrechtzuhalten.

Solange der Mensch im Verfügbarkeitskonzept des automatisierten Fahrzeugs vorkommt – ob als Überwacher des Systems oder zur Übernahme der Fahraufgabe –, benötigen sowohl der Mensch als auch die Maschine eine geeignete Repräsentation des jeweils anderen Akteurs. Transparente und an das mentale System des Menschen angepasste Schnittstellen

sind die Voraussetzung für das notwendige Situations- und Systembewusstsein im Umgang mit dem automatisierten Fahren. Andererseits muss auch das technische System in der Lage sein, den mentalen Zustand des Fahrers, seine Intentionen sowie sein Verhalten richtig zu interpretieren und in einem Fahrermodell dynamisch abzubilden. In adaptiven und kooperativen Gestaltungskonzepten werden diese Aspekte bereits in hochautomatisierten Fahrzeugen prototypisch umgesetzt [44, 67]. Darüber hinaus arbeiten aktuell Automobilhersteller und Forschungseinrichtungen in diversen Projekten an den potenziellen Lösungen dieser Probleme ([www.adaptive-ip.eu](http://www.adaptive-ip.eu); [www.incarin.de](http://www.incarin.de); [www.urban-online.org](http://www.urban-online.org)).

In den Umfrageergebnissen werden teilweise vorhandene Widersprüche zwischen dem technisch Möglichen und den von der Bevölkerung gewünschten Innovationen sichtbar. Auch wenn man sich mehrheitlich an die Übernahme bestimmter Fahraufgaben (z. B. Geschwindigkeitsregelung) durch Assistenzsysteme gewöhnt hat, wollen die meisten buchstäblich nur ungern das Lenkrad aus der Hand geben. Die heutigen kognitiven und affektiven Repräsentationen zu der Rolle des Fahrers sind noch sehr stark mit dem traditionellen Bild des aktiven Chauffeurs verbunden. Die Vorstellung, im Fahrzeug die Rolle des passiven Passagiers einzunehmen, findet nur wenig Akzeptanz. Das traditionelle, manuell gesteuerte Auto ist in der Bevölkerung noch derart stark mit den Idealvorstellungen assoziiert, dass vollständig autonome Fahrzeuge mehrheitlich noch nicht den Mobilitätsbedürfnissen entsprechen. Die noch offene Frage ist, ob eine schrittweise, evolutionäre Automatisierung des Fahrzeugs die notwendigen Veränderungen mentaler Modelle bezüglich der Rollenerwartungen im autonomen Fahrzeug erreichen kann. Eine situationspezifische Übergabe der Fahraufgaben an das autonome Fahrzeug kann dabei, wie an den hohen Akzeptanzraten des Valet-Parkens ersichtlich wird, eine mögliche zielführende Alternative darstellen.

Die Ergebnisse der Befragung liefern ferner Anhaltspunkte für mögliche Strategien dieser Transformation, die sich an den Bedürfnissen und Emotionen potenzieller Nutzer orientieren. Das Hauptargument bisheriger öffentlicher Debatten für die Einführung autonomer Fahrzeuge ist die erhöhte Sicherheit im Straßenverkehr. Diese Wahrnehmung wird jedoch nicht von der breiten Bevölkerung geteilt. Vielmehr sehen die Teilnehmer dieser Studie ihre Bedürfnisse wie Stressreduktion, Komfort und Umweltfreundlichkeit im Falle einer Nutzung autonomer Fahrzeuge erfüllt. Gleichwohl sind damit verbundene Emotionen wie Machtlosigkeit und Angst wirkungsmächtige, akzeptanzhemmende Faktoren. Der menschliche Denkkapparat ist nicht in der Lage, das Risiko seltener Ereignisse objektiv einzuschätzen [58], sodass die Ängste und Bedenken zu irrationalen Entscheidungen führen können. Eine nutzerzentrierte Entwicklung bedeutet aus dieser Sicht, auf bestehende Bedürfnisse sowohl in der Kommunikation als auch in der konkreten Gestaltung der Systeme einzugehen.

Für den potenziellen Nutzer stellt sich letztendlich die Frage des Mehrwertes eines autonomen Fahrzeugs gegenüber dem bislang noch hoch in der Gunst stehenden manuell gesteuerten Vehikel. Worauf soll die Aufmerksamkeit gerichtet werden, wenn man sich schon nicht mehr aus Sicherheitsgründen mit der Fahrzeugsteuerung beschäftigen „darf“? Entgegen den Erwartungen haben die Teilnehmer mehrheitlich nicht das erweiterte Infotainment-Sortiment von Internet bis Fernsehen vor Augen, sondern wollen vielmehr ungestört

den Blick auf die Landschaft genießen. Wie stabil und valide diese Aussagen im tatsächlichen Umgang mit automatisierten Fahrzeugen sind, werden zukünftige Studien zeigen müssen. Vielleicht steht dieses Bedürfnis aber auch in der Tradition deutscher Romantik und bietet einen neuen Impuls für die Gestaltung des automatisierten, „naturnahen“ Raums.

---

## Literatur

1. Wilson, J.R., Rutherford, A.: Mental Models: Theory and Application in Human Factors. *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.* 31, 617–634 (1989)
2. Bainbridge, L.: Ironies of automation. In: Johannsen, G. (ed.) *Analysis, design and evaluation of man-machine systems*. pp. 151–157. Pergamon (1982)
3. Norman, D.: The “problem” with automation: inappropriate feedback and interaction, not “over-automation.” *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 327, 585–593 (1990)
4. Sheridan, T.B.: Supervisory control. In: Salvendy, G. (ed.) *Handbook of human factors*. pp. 1243–1268. Wiley, New York (1987)
5. Boeing Commercial Airline Group: Statistical summary of commercial jet aircraft accidents: Worldwide operations 1959–2005., <http://www.boeing.com/news/techissues/pdf/statsum.pdf>
6. Dismukes, R.K., Berman, B.A., Loukopoulos, L.D.: *The Limits of Expertise: Rethinking Pilot Error and the Causes of Airline Accidents*. Ashgate Publishing, Ltd. Federal (2007)
7. Bainbridge, L.: Ironies of Automation. *Automatica*. 19, 775–779 (1983)
8. Endsley, M.R., Kiris, E.O.: The Out-of-the-Loop Performance Problem and Level of Control in Automation. *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.* 37, 381–394 (1995)
9. Madhavan, P., Wiegmann, D.A.: Similarities and differences between human – human and human – automation trust: an integrative review. *Theor. Issues Ergon. Sci.* 8, 277–301 (2007)
10. Onnasch, L., Wickens, C.D., Li, H., Manzey, D.: Human Performance Consequences of Stages and Levels of Automation: An Integrated Meta-Analysis. *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.* 56, 476–488 (2013)
11. Endsley, M.R.: Situation awareness. In: Salvendy, G. (ed.) *Handbook of human factors and ergonomics*. pp. 528–542. Wiley, New York (2006)
12. Endsley, M.R., Bolte, B., Jones, D.G.: *Designing for situation awareness: An approach to human-centered design*. Taylor & Francis, London (2003)
13. Billings, C.E.: *Aviation Automation: The Search for a Human-Centered Approach*. Human Factors in Transportation. Lawrence Erlbaum Associates Publishers (1997)
14. Parasuraman, R., Sheridan, T.B., Wickens, C.D.: A model for types and levels of human interaction with automation. *Syst. Man Cybern. Part A Syst. Humans, IEEE Trans.* 30, 286–297 (2000)
15. Christoffersen, K., Woods, D.D.: How to make automated systems team players. In: Salas, E. (ed.) *Advances in Human Performance and Cognitive Engineering Research*. pp. 1–12. Elsevier Science Ltd. (2002)
16. Kaber, D.B., Riley, J.M., Tan, K.-W., Endsley, M.R.: On the Design of Adaptive Automation for Complex Systems. *Int. J. Cogn. Ergon.* 5, 37–57 (2001)
17. Inagaki, T.: Traffic systems as joint cognitive systems: issues to be solved for realizing human-technology coagency. *Cogn. Technol. Work.* 12, 153–162 (2010)
18. Prevot, T., Homola, J.R., Martin, L.H., Mercer, J.S., Cabrall, C.D.: Toward Automated Air Traffic Control – Investigating a Fundamental Paradigm Shift in Human/Systems Interaction. *Int. J. Hum. Comput. Interact.* 28, 77–98 (2012)
19. Challenger, R., Clegg, C.W., Shepherd, C.: Function allocation in complex systems: reframing an old problem. *Ergonomics*. 56, 1051–69 (2013)

20. Grote, G., Weyer, J., Stanton, N.A.: Beyond human-centred automation – concepts for human-machine interaction in multi-layered networks. *Ergonomics*. 57, 289–94 (2014)
21. Hancock, P.A.: Automation: how much is too much? *Ergonomics*. 57, 449–54 (2014)
22. Arthur, C.: Google’s driverless car: no steering wheel, two seats, 25mph, <http://www.theguardian.com/technology/2014/may/28/google-reveals-driverless-car-prototype>
23. Cummings, P.M.L., Ryan, J.: Shared Authority Concerns in Automated Driving Applications. [http://web.mit.edu/aeroastro/labs/halab/papers/cummingsryan\\_driverless2013\\_draft.pdf](http://web.mit.edu/aeroastro/labs/halab/papers/cummingsryan_driverless2013_draft.pdf). Letzter Zugriff: 28.08.2014
24. Merat, N., Lee, J.D.: Preface to the Special Section on Human Factors and Automation in Vehicles: Designing Highly Automated Vehicles With the Driver in Mind. *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.* 54, 681–686 (2012)
25. Hoogendoorn, R., Arem, B. Van, Hoogendoorn, S.: Automated Driving, Traffic Flow Efficiency And Human Factors: A Literature Review. Transportation Research Board 93rd Annual Meeting. pp. 1–18. Transportation Research Board (2014)
26. Lee, J.D., See, K.A.: Trust in Automation: Designing for Appropriate Reliance. *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.* 46, 50–80 (2004)
27. Moray, N., Inagaki, T.: Attention and complacency. *Theor. Issues Ergon. Sci.* 1, 354–365 (2000)
28. Ghazizadeh, M., Peng, Y., Lee, J.D., Boyle, L.N.: Augmenting the Technology Acceptance Model with Trust: Commercial Drivers’ Attitudes towards Monitoring and Feedback. *Proc. Hum. Factors Ergon. Soc. Annu. Meet.* 56, 2286–2290 (2012)
29. Kazi, T., Stanton, N., Walker, G., Young, M.: Designer driving: drivers’ conceptual models and level of trust in adaptive cruise control. *Int. J. Veh. Des.* 45, 339–360 (2007)
30. Koustanai, A., Cavallo, V., Delhomme, P., Mas, A.: Simulator Training With a Forward Collision Warning System: Effects on Driver-System Interactions and Driver Trust. *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.* 54, 709–721 (2012)
31. Stanton, N.A., Young, M.S.: Driver behaviour with adaptive cruise control. *Ergonomics*. 48, 1294–313 (2005)
32. Rajaonah, B., Tricot, N., Anceaux, F., Millot, P.: The role of intervening variables in driver-ACC cooperation. *Int. J. Hum. Comput. Stud.* 66, 185–197 (2008)
33. Flemisch, F., Kelsch, J., Löper, C., Schieben, A., Schindler, J.: Automation spectrum, inner/outer compatibility and other potentially useful human factors concepts for assistance and automation. In: Waard, D. de, Flemisch, F., Lorenz, B., Oberheid, H., and Brookhuis, and K. (eds.) *Human Factors for Assistance and Automation*. pp. 1–16. Shaker, Maastricht (2008).
34. Beggiano, M., Krems, J.F.: The evolution of mental model, trust and acceptance of adaptive cruise control in relation to initial information. *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.* 18, 47–57 (2013)
35. Verberne, F.M.F., Ham, J., Midden, C.J.H.: Trust in Smart Systems: Sharing Driving Goals and Giving Information to Increase Trustworthiness and Acceptability of Smart Systems in Cars. *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.* 54, 799–810 (2012)
36. Waytz, A., Heafner, J., Epley, N.: The Mind in the Machine: Anthropomorphism Increases Trust in an Autonomous Vehicle. *J. Exp. Soc. Psychol.* 52, 113–117 (2014)
37. Lee, J.D., Moray, N.: Trust, self-confidence, and operators’ adaption to automation. *Int. J. Human-Computer Stud.* 40, 152–184 (1994)
38. Federal Aviation Administration: Safety Alert for Operators 13002. F. S. Service. Departement of Transportation, Washington DC (2013)
39. Buld, S., Krüger, H.-P., Hoffmann, S., Kaussner, A., Tietze, H., Totzke, I.: Wirkungen von Assistenz und Automation auf Fahrerzustand und Fahrsicherheit. Veröffentlichter Abschlussbericht Projekt EMPHASIS: Effort- Management und Performance-Handling in sicherheitsrelevanten Situationen. Würzburg: Interdisziplinäres Zentrum für Verkehrswissenschaften an der Universität Würzburg (IZVW), Würzburg: (2002)

40. Ward, N.J.: Task automation and skill development in a simplified driving task. In Proceedings of the XIVth Triennial Congress of the International Ergonomics Association and 44th Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society. pp. 302–305, San Diego, CA (Santa Monica, CA: HFES) (2000)
41. Ma, R., Kaber, D.B.: Situation awareness and workload in driving while using adaptive cruise control and a cell phone. *Int. J. Ind. Ergon.* 35, 939–953 (2005)
42. Merat, N., Jamson, A.H., Lai, F.C.H., Carsten, O.: Highly Automated Driving, Secondary Task Performance, and Driver State. *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.* 54, 762–771 (2012).
43. Gasser, T.M., Arzt, C., Ayoubi, M., Bartels, A., Eier, J., Flemisch, F., Häcker, D., Hesse, T., Huber, W., Lotz, C., Maurer, M., Ruth-Schumacher, S., Schwarz, J., Vogt, W.: *BAST-Bericht F 83: Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung*. Bremerhaven. (2012)
44. Flemisch, F.O., Bengler, K., Bubb, H., Winner, H., Bruder, R.: Towards cooperative guidance and control of highly automated vehicles: H-Mode and Conduct-by-Wire., <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24559139>, (2014)
45. Craik, K.J.W.: *The nature of explanation*. Cambridge University Press, Cambridge, England (1943)
46. Johnson-Lairds, P.N.: *Mental Models: Towards a Cognitive Science of Language, Influence and Consciousness*. Cambridge University Press, Cambridge, UK (1983)
47. Jones, N.A., Ross, H., Lynam, T., Perez, P., Leitch, A.: *Mental Models: An Interdisciplinary Synthesis of Theory and Methods*. *Ecol. Soc.* 16, 46 (2011)
48. Moray, N.: Models of models of – mental models. In: Moray, N. (ed.) *Ergonomics: major writings*. pp. 506–552. Taylor and Francis, London, UK. (2004)
49. Nersessian, N.J.: The cognitive basis of model-based reasoning in science. In: Carruthers, S.S. and Siegal, M. (eds.) *The cognitive basis of science*. pp. 133–153. Cambridge University Press, Cambridge, UK (2002)
50. Norman, D.A.: Some observations on mental models. In: Baecker, R.M. and Buxton, W.A.S. (eds.) *Human-computer Interaction*. pp. 241–244. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA (1987)
51. Zhang, W., Xu, P.: Do I have to learn something new? Mental models and the acceptance of replacement technologies. *Behav. Inf. Technol.* 30, 201–211 (2011)
52. d’Apollonia, S.T., Charles, E.S., Boyd, G.M.: Acquisition of Complex Systemic Thinking: Mental Models of Evolution. *Educ. Res. Eval.* 10, 499–521 (2004)
53. Gefen, D., Karahanna, E., Straub, D.W.: Inexperience and experience with online stores: The importance of tam and trust. *IEEE Trans. Eng. Manag.* 50, 307–321 (2003)
54. Stanton, N., Young, M.S.: A proposed psychological model of driving automation. *Theor. Issues Ergon. Sci.* 1, 315–331 (2000)
55. Boer, E.R., Hoedemaeker, M.: Modeling driver behavior with different degrees of automation: A Hierarchical Decision Framework of Interacting Mental Models. In: Al., A.G.G. et (ed.) *17th European Annual Conference on Human Decision Making and Manual Control*. pp. 63–72. Elsevier, Amsterdam (1989)
56. Schröder, T., Huck, J., de Haan, G.: *Transfer sozialer Innovationen: Eine zukunftsorientierte Fallstudie zur nachhaltigen Siedlungsentwicklung*. VS Verlag fuer Sozialwissenschaften, Wiesbaden (2011)
57. Gigerenzer, G., Goldstein, D.G.: Reasoning the fast and frugal way: models of bounded rationality. *Psychol. Rev.* 103, 650–69 (1996)
58. Kahnemann, D.: *Thinking, fast and slow*. Penguin, New York (2011)
59. Loewenstein, G.F., Lerner, J.S.: The role of affect in decision making. In: Davidson, R., Scherer, K., and Goldsmith, H. (eds.) *Handbook of affective science*. pp. 619–642. Oxford University Press, New York (2003)
60. Kunda, Z.: The case for motivated reasoning. *Psychol. Bull.* 108, 480–498 (1990)

61. MacKinnon, N.J., Heise, D.R.: *Self, Identity, and Social Institutions*. NY: Palgrave Macmillan, New York (2010)
62. Wolf, I., Schröder, T., Neumann, J., de Haan, G.: Changing minds about electric cars: An empirically grounded agent-based modeling approach. Vorabdruck: <http://arxiv.org/abs/1405.6230>, (2014)
63. Continental AG: *Continental-Mobilitätsstudie 2013*. (2013)
64. Infas, DLR: *Mobilität in Deutschland (MiD) 2008*. Infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Bonn, Berlin (2008)
65. Osgood, C.E., Suci, G.J., Tannenbaum, P.H.: *The Measurement of Meaning*. Linguistic Society of America, Urbana (1957)
66. Heise, D.R.: *Expressive order: Confirming sentiments in social action*. Springer, New York (2007)
67. Löper, C., Kelsch, J., Flemisch, F.: Kooperative, manöverbasierte Automation und Arbitrierung als Bausteine für hochautomatisiertes Fahren. In: Gesamtzentrum für Verkehr Braunschweig (ed.) *Automatisierungs-, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*. pp. 215–237, Braunschweig (2008)
68. Buld, S., Tietze, H., Krüger, H.: Auswirkungen von Teilautomation auf das Fahren. In: Maurer, M.; Stiller, C. (Hrsg.): *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung*. S. 161–187, Springer, Berlin (2005)

# Kommunikationsprobleme zwischen autonomen Fahrzeugen und menschlichen Fahrern

# 7

Berthold Färber

## Inhaltsverzeichnis

<b>7.1 Einleitung</b>	128
<b>7.2 Fragen</b>	129
<b>7.3 Wie kommunizieren Verkehrsteilnehmer?</b>	129
7.3.1 Schematismenbildung	130
7.3.2 Vorwegnehmendes Handeln	130
7.3.3 Nonverbale Kommunikation	130
7.3.4 Gesichtsausdruck und Augenkontakt	131
7.3.5 Gesten und Körperbewegungen	131
<b>7.4 Auswirkungen der Kommunikationsmöglichkeiten auf die Verkehrssicherheit</b>	133
7.4.1 Sonderfälle: Polizisten und Fahrzeuge mit Sonderrechten erkennen	134
<b>7.5 Auswirkungen der Kommunikationsmöglichkeit auf die Akzeptanz autonomer Fahrzeuge</b>	137
<b>7.6 Mit welchem mentalen Modell werden andere Verkehrsteilnehmer auf Fahrfehler von autonomen Fahrzeugen reagieren?</b>	138
<b>7.7 Kulturelle Unterschiede</b>	139
<b>7.8 Kompensationsmöglichkeiten</b>	142
<b>7.9 Neue Kommunikationsformen für einen effektiven Informationsaustausch aus psychologischer und technischer Sicht</b>	143
<b>7.10 Fazit</b>	145
<b>Literatur</b>	146

---

B. Färber (✉)  
Universität der Bundeswehr München, Deutschland  
berthold.farber@unibw.de

## 7.1      Einleitung

Häufig wird im Zusammenhang mit autonomen Landfahrzeugen der Luftverkehr als Beispiel herangezogen, bei dem – abgesehen von Start und Landung – der Autopilot die Steuerung übernimmt. Somit stellt sich die Frage: Was können wir aus dem Luftverkehr lernen? Die Gemeinsamkeit zwischen autonom fliegenden und autonom fahrenden Fahrzeugen besteht darin, dass der Pilot bzw. Fahrer die letzte Verantwortung trägt. Es gibt aber mehrere Unterschiede zwischen Straßenverkehr und Luftverkehr (und damit ist nicht die Art der Fortbewegung gemeint), die eine Übertragung zwischen den Systemen nicht sinnvoll macht. Ein wesentlicher Unterschied, der im vorliegenden Beitrag von zentraler Bedeutung ist, ist die Anwendung von Regeln sowie die Art der Steuerung. In Bereichen, in denen Flugzeuge aufeinandertreffen – also vor allem beim Rollverkehr – ist alles durch strikte Regeln festgelegt. Weiterhin gibt es eine übergeordnete Überwachung und Steuerung, die dem Piloten exakte Anweisungen gibt und in Zweifelsfällen, die möglicherweise nicht durch Regeln gedeckt sind, Entscheidungen trifft und an den Piloten kommuniziert. Der Pilot hat also in diesen Situationen keinerlei Ermessens- oder Entscheidungsspielraum. Er ist ausschließlich ein ausführendes Organ. Im Vergleich zum Luftverkehr stellt der Straßenverkehr eher ein selbstorganisiertes, chaotisches System dar, das zwar prinzipiell durch Regeln geordnet wird, bei dem aber viele Situationen nicht in einer eindeutigen Regel festgelegt werden können. In diesem Fall kommt dann immer § 1 der Straßenverkehrsordnung (StVO) zur Anwendung, der besagt: „Die Teilnahme am Straßenverkehr erfordert ständige Vorsicht und gegenseitige Rücksicht“, und „Wer am Verkehr teilnimmt, hat sich so zu verhalten, dass kein anderer geschädigt, gefährdet oder mehr, als nach den Umständen unvermeidbar, behindert oder belästigt wird.“ Im Sinne eines erschöpfenden Regelwerks für das Verhalten in allen denkbaren Situationen gibt es also im Straßenverkehr eine große Kategorie „Sonstige“, die von Verkehrsteilnehmern im Einvernehmen und unter Berücksichtigung von § 1 STVO gelöst werden müssen. Somit gehört zu den zentralen Aufgaben eines Fahrers zur sicheren Teilnahme am Straßenverkehr auch die Einschätzung des Verhaltens anderer Verkehrsteilnehmer. Diese Einschätzung und Vorhersage des Verhaltens anderer Verkehrsteilnehmer beruht zunächst auf der Annahme von mehr oder weniger regelkonformem Verhalten der anderen. Zu der Absichtsabschätzung gehört aber auch die Kommunikation der Fahrer und Verkehrsteilnehmer untereinander durch Aktionen und Zeichen. Mit anderen Worten: Neben den „offiziellen“ Regeln existiert ein Satz von informellen Regeln, die den Verkehr steuern.

Wer als Tourist in anderen Ländern unterwegs ist, sei es als Autofahrer oder Fußgänger, kann aus eigener Anschauung erleben, wie sehr informelle Regeln, kulturspezifische Verhaltensweisen und die Kommunikation zwischen Verkehrsteilnehmern den Verkehr bestimmen. Trifft man als menschlicher Fahrer auf diesen anders gearteten „Regelkanon“, so erlebt man zunächst eine Phase der Irritation. In der zweiten Phase der Adaptation passt man sich im Laufe der Zeit mehr unbewusst an diese neuen, nirgendwo exakt fixierten Regeln an. In der Phase der Konsolidierung erscheinen sie als selbstverständlich, obwohl sie nicht fixiert und teilweise nicht einmal exakt zu beschreiben sind.



Der motorisierte Straßenverkehr stellt ein System mit sehr unterschiedlichen Akteuren dar, das zum Ziel hat, die Teilnehmer sicher, störungsfrei und schnell zum Ziel zu bringen. Unter Systemgesichtspunkten ist unmittelbar einleuchtend, dass die Beachtung informeller Regeln, die Kommunikation zwischen den Verkehrsteilnehmern und Verhaltensvorhersage anderer zwei wichtige Funktionen erfüllt: Sie unterstützen zum einen den Verkehrsfluss und dienen zum anderen zur Kompensation von Fehlern.

---

## 7.2 Fragen

In technischen Termini ausgedrückt sind Menschen multisensorische lernfähige Systeme. Das bedeutet, sie sind in der Lage, verschiedene, auch schwache und nicht eindeutige Signale zu einem Gesamtbild zu vereinen und zu interpretieren. Sie sind weiterhin in der Lage, sich verändernden Gegebenheiten anzupassen und so die beiden o. g. Funktionen – Kompensation der Fehler anderer und Verbesserung des Verkehrsflusses – zu unterstützen. Was aber passiert, wenn nicht nur Menschen, sondern zusätzlich Roboter-Fahrzeuge am Verkehr teilnehmen, die sich streng an Regeln halten und die informellen Regeln sowie Teile der Kommunikation nicht verstehen? Wie reagieren menschliche Fahrer auf diese neuen Verkehrsteilnehmer, speziell in der Übergangsphase, in der die Fahrroboter noch die Minderheit stellen? Sind Menschen in der Lage, schwierige oder scheinbar unauflösbare Situationen kooperativ mit Fahrrobotern zu lösen? Schließlich, über welche Eigenschaften oder Kennzeichnungen müssten Fahrroboter minimal verfügen, um am gemischten Verkehr mit menschlichen Fahrern problemlos teilnehmen zu können?

Diesen Fragen will sich der Beitrag von verschiedenen Seiten nähern. Da autonome Fahrzeuge bislang hauptsächlich unter dem Aspekt technischer Performanz untersucht wurden wie bei der Urban challenge [1] oder der Berta-Benz-Fahrt [2] bzw. im Mischverkehr stets ein Sicherheitsfahrer an Bord war, um im Zweifelsfall einzugreifen (z. B. beim Stadtpilot [3]), existiert zu den oben angeführten Fragen kaum originäre Literatur. Vieles wird daher aus den Erkenntnissen anderer Wissenschaftsbereiche abzuleiten sein.

---

## 7.3 Wie kommunizieren Verkehrsteilnehmer?

Neben den vorgeschriebenen Zeichen zum Anzeigen einer Absicht wie Blinker, Warnblinkanlage, Bremslicht, Hupe und Lichthupe kommunizieren Verkehrsteilnehmer über eine Reihe „informeller“ Kommunikationskanäle. Diese Kommunikation im Straßenverkehr ist – im Vergleich zur normalen menschlichen Kommunikation – durch eine eingeschränkte Verständigungsmöglichkeit geprägt. Nach Merten [4] gibt es verschiedene Möglichkeiten der Kommunikation.

### 7.3.1 Schematismenbildung

Bei der Schematismenbildung wird aufgrund von bestimmten Eigenschaften eines Verkehrsteilnehmers auf dessen Verhalten geschlossen. Beispielsweise wird sich eine ältere Person mit Mobilitätsproblemen anders verhalten als ein Kind. Dem Fahrer eines Sportwagens unterstellt man ein anderes Fahrverhalten als dem Fahrer einer großen Limousine. Diese Schematismen treffen im Fahralltag natürlich nicht immer zu. Sie funktionieren allerdings im Prinzip und helfen, das Gesamtsystem Verkehr zu stabilisieren.

### 7.3.2 Vorwegnehmendes Handeln

Durch kleine Handlungsschritte ist die Richtung des eigenen Verhaltens für andere Verkehrsteilnehmer frühzeitig erkennbar. Beispiele: Nähert sich ein Fahrzeug dem linken Fahrstreifen (ohne den Blinker zu setzen), so deutet dies auf einen beabsichtigten Spurwechsel hin. Geht ein Fußgänger zielstrebig auf einen Zebrastreifen zu, so wird der Autofahrer annehmen, dass er die Straße an dieser Stelle überqueren will.

### 7.3.3 Nonverbale Kommunikation

Bei den informellen Kommunikationskanälen spielt die nonverbale Kommunikation vor allem in sogenannten Verhandlungssituationen eine Rolle. Nonverbale Kommunikation ist als Verständigungsform sicher die älteste Form der Verständigung zwischen Lebewesen. Wissenschaftlich hat sich schon Charles Darwin im Jahr 1874 in seinem Buch *Der Ausdruck der Gemüthsbewegungen beim Menschen und den Thieren* [5] mit nonverbaler Kommunikation beschäftigt. Wie subtil nonverbale Signale sind, ist aus einer alten Studie von Pfungst [6] über den „klugen Hans“ bekannt, ein Pferd, das aufgrund unbewusster minimaler Signale seines Besitzers oder des Auditoriums „rechnen“ konnte. Die dafür wichtige Erkenntnis lautet, dass nonverbale Signale auch unbewusst ausgesendet werden und daher einer Analyse nicht immer leicht zugänglich sind.

Prinzipiell lassen sich nonverbale Signale in drei Bereiche einteilen:

- Gesichtsausdruck und Augenkontakt,
- Gesten und Körperbewegungen,
- Stimme und Art des Ausdrucks.

Für den Anwendungsfall „Straßenverkehr“ sind nur Gesichtsausdruck/Augenkontakt und Gesten/Körperbewegungen relevant und sollen daher weiter verfolgt werden.

### 7.3.4 Gesichtsausdruck und Augenkontakt

Im Innerortsverkehr spielt der Blickkontakt zwischen Autofahrern, aber auch zwischen Autofahrern und anderen Verkehrsteilnehmern (Fußgängern, Radfahrern) eine wesentliche Rolle. Ein Fußgänger, der eine Straße ohne Querungshilfe überqueren will, versichert sich mittels Blickkontakt zum Autofahrer, dass er gesehen wird. Wird der Blick vom Autofahrer erwidert, so geht der Fußgänger davon aus, dass er gesehen wird und der Autofahrer Rücksicht nimmt [7].

Beim Einscheren aus einer untergeordneten Straße und dichtem Verkehr auf der bevorrechtigten Straße vergewissert sich der Einscherende ebenfalls mittels Blickkontakt, dass er – trotz sehr geringer Zeitlücke – einscheren darf, da der Fahrer auf der bevorrechtigten Straße seine Geschwindigkeit situationsangepasst reduziert.

Der Blickkontakt ist eine dyadische Kommunikation, d. h., der Blick wird von demjenigen, der angesehen wird, erwidert bzw. nicht erwidert. Wendet der Angesehene seinen Blick ab, so gibt er zu verstehen, dass er den anderen „nicht gesehen“ hat, also auf sein Zeichen und die Verhandlung nicht eingehen will. Bezüglich der Auswirkungen dieser Strategie auf autonome Fahrzeuge ist zu unterscheiden zwischen autonomen Fahrzeugen, bei denen der Fahrersitz besetzt oder unbesetzt ist.

Ist der Sitz des Fahrers besetzt, so gibt es zwei Möglichkeiten:

3. Der „Fahrer“, d. h. die Person auf dem Fahrersitz, ist mit Tätigkeiten im Innenraum befasst und folglich kommt kein Blickkontakt zustande. In diesem Fall kann der andere Verkehrsteilnehmer nicht davon ausgehen, dass sein Verhandlungsangebot angenommen wird, und wird sich entsprechend verhalten.
4. Der Fahrer des autonomen Fahrzeugs betrachtet die Umgebung, weshalb sich die Blicke der beiden Verkehrsteilnehmer treffen, wenn auch eher zufällig. Hier kann der Blickkontakt bei dem nicht-autonomen Verkehrsteilnehmer zu einer falschen Einschätzung der Situation und damit zu einem Konflikt führen.

Ist der Fahrersitz nicht besetzt so erhält der andere Verkehrsteilnehmer keine Information, d. h., die Situation ist wie bei dem Szenario „kein Blickkontakt“.

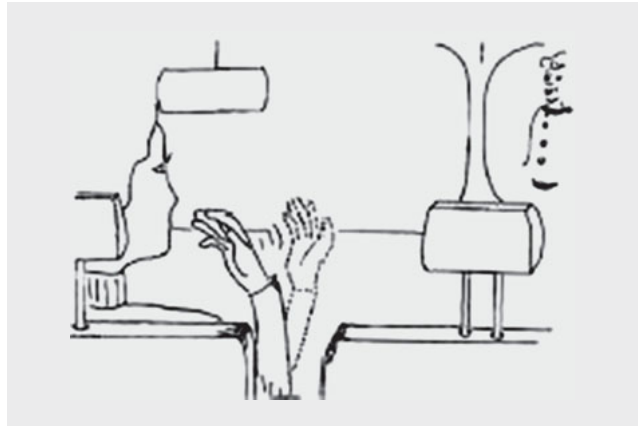
### 7.3.5 Gesten und Körperbewegungen

Gesten sind eine weit verbreitete und effektive Art der Verständigung zwischen Verkehrsteilnehmern. Viele Zeichen, die durch Gesten dargestellt werden, sind auch allgemein verständlich und weitgehend eindeutig. So drückt Nicken das Einverständnis mit dem Ansinnen oder der Bitte des anderen aus. Bewegt ein Fußgänger die Arme seitwärts auf und ab, so fordert er Fahrzeuge zum Anhalten auf, beispielsweise um eine Unfallstelle abzusichern. Die Handbewegung von oben nach unten (s. Abb. 7.1) wird eingesetzt, um anderen zu sagen, dass sie langsamer fahren sollen. Eine wischende Handbewegung (s. Abb. 7.2)

**Abb. 7.1** Slow-down  
(Quelle: [8])



**Abb. 7.2** Wischende Hand-  
bewegung (Quelle: [8])



**Abb. 7.3** Anbietende Geste



oder die anbietende Geste mit nach oben zeigender Handfläche als Geste (s. Abb. 7.3) bedeutet: Bitte fahre oder gehe Du zuerst – ich verzichte auf mein Vorrecht.

---

## 7.4 Auswirkungen der Kommunikationsmöglichkeiten auf die Verkehrssicherheit

Auf den ersten Blick scheint es, als wären die informellen Zeichen wie Blickkontakt, Gesten oder vorwegnehmendes Handeln weniger eindeutig als die vorgeschriebenen Zeichen wie Blinker, Hupe, Lichthupe etc. Dies ist aber keineswegs der Fall. Es ist interessant, dass der Philosoph Heidegger, der sich in seiner Monografie *Sein und Zeit* [9] mit der Eigenschaft von Zeichen auseinandersetzt, das Auto als Beispiel wählt: „An den Kraftwagen ist neuerdings ein roter, drehbarer Pfeil angebracht, dessen Stellung jeweils, zum Beispiel an einer Wegkreuzung, zeigt, welchen Weg der Wagen nehmen wird“ (zitiert nach Frerichs, [10], S. 138). Vielleicht war damals dieses Zeichen noch ein-eindeutig und unabhängig von der Situation, jedoch wird schnell deutlich, dass Signale in unterschiedlichen Kontexten unterschiedliche Bedeutung besitzen. Alle Zeichen, d. h. verbale und nonverbale, sind nur in der Verknüpfung und im Kontext verständlich. Wie Savigny [11] ausführt, muss zwischen Signal und Äußerungsbedeutung unterschieden werden. Eine Lichthupe hat je nach Situation eine unterschiedliche Äußerungsbedeutung. Die Betätigung der Lichthupe durch einen Fahrer, der Vorfahrt hat und verzögert, wird als Angebot zum Einscheren verstanden, beschleunigt er oder fährt mit gleicher Geschwindigkeit weiter, so drückt das gleiche Signal aus, dass er auf seiner Vorfahrt beharrt. Auch der rechts gesetzte Blinker kann bedeuten: „Ich biege ab.“ oder „Ich fahre langsamer, weil ich eine Parklücke suche, und du kannst oder sollst überholen.“

Mit Blick auf die schwächeren Verkehrsteilnehmer ist noch das Beispiel „Fahrradfahrer“ interessant. Radfahrer verwenden noch die Zeichen aus den Anfängen der Motorisierung zur Anzeige einer beabsichtigten Richtungsänderung. Das bedeutet für die Mustererkennung, dass – abgesehen vom Verkehr auf Autobahnen – nicht nur der Fahrradfahrer an sich, sondern auch seine Handzeichen sicher erkannt werden müssen.

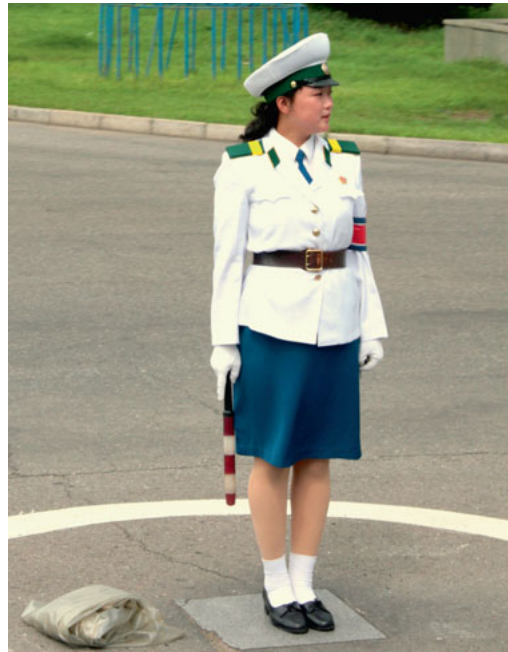
Was bedeutet das für die Verkehrssicherheit? Zunächst ist davon auszugehen, dass autonome Fahrzeuge die mehrfache und kontextabhängige Bedeutung der Signale nicht kennen und sich daher sehr konservativ verhalten müssen. So lange eine sichere Blickerfassung oder das Handzeichen eines Fußgängers nicht sicher erfassbar sind und unter Berücksichtigung der Situation interpretiert werden können, so lange müssen Fußgänger, die sich auf einem potenziellem Kollisionskurs befinden, als Gefahr interpretiert werden und eine entsprechende Reaktion des autonomen Fahrzeugs auslösen.

### 7.4.1 Sonderfälle: Polizisten und Fahrzeuge mit Sonderrechten erkennen



**Abb. 7.4** Verkehrsposten: Verkehr fließt

**Abb. 7.5** Verkehrsposten (Nord-Korea): Brust dem Fahrer zugewandt bedeutet „Stop“



Erkennen autonome Fahrzeuge Fußgänger auf der Fahrbahn, so werden sie anhalten. Was passiert aber, wenn der Fußgänger ein Polizist ist, der den Verkehr regelt? Zum einen muss der Polizist als stehendes Hindernis erkannt werden, dem der Fahrroboter ausweichen muss. Darüber hinaus gilt es aber, die Zeichen des Polizisten richtig zu interpretieren. Verhält sich dieser streng regelkonform, wie in den Abb. 7.4 und Abb. 7.5 gezeigt, so kann ein autonomes Fahrzeug die entsprechende Bedeutung lernen. Aus Erfahrung ist aber bekannt, dass Polizisten, die den Verkehr regeln oder Einweiser auf Parkplätzen auch sehr dynamische Gesten verwenden, um den Verkehr zu beschleunigen, also mit den Armen oder Händen winken oder mit den Armen rudern (s. Abb. 7.6, Abb. 7.7 und Abb. 7.8). Menschen verstehen diese Zeichen vor allem aus dem Kontext heraus. Autonome Fahrzeuge müssten – neben der Fähigkeit zur Mustererkennung für Gesten und Körperhaltungen, auch über ein Kontextwissen verfügen, das ihnen die richtige Erkennung und Bewertung der Gesten ermöglicht.

Einen Spezialfall stellt die Berücksichtigung von Fahrzeugen mit Sonderrechten, also Einsatzfahrzeugen von Polizei, Feuerwehr oder Rettungsfahrzeugen dar. Diese Fahrzeuge machen zunächst mit akustischen Signalen auf sich aufmerksam. Optische und akustische Warnsysteme (in Deutschland Martinshorn und Blaulicht) verpflichten den übrigen Verkehr zum Anhalten, zur Gewährung der Vorfahrt an Kreuzungen oder zum Öffnen einer Rettungsgasse. Im täglichen Straßenverkehr werden Fahrzeuge noch nicht anhalten, wenn von Ferne das akustische Signal zu hören ist. Ein derartiges Verhalten würde den Verkehr zu sehr beeinträchtigen, z. B. in der Nähe eines Krankenhauses. Zudem ist eine exakte Lokalisierung der Richtung, aus der das akustische Signal kommt, bei größerer Entfernung nicht möglich. Auch die Erkennung des Sonderfahrzeugs in größerer Entfernung und die fahrspurbezogene Zuordnung dürften sich ebenfalls schwierig gestalten. Deshalb müssten autonome Fahrzeuge aus Sicherheitsgründen bei jedem dieser Signale anhalten, um den Verkehr nicht zu gefährden. Wie sich das auf die Akzeptanz auswirkt, wird in der Folge näher analysiert.

**Abb. 7.6** Ein Polizist in Minneapolis gibt Zeichen, dass der Verkehr auf einer Straßenseite losfahren kann



**Abb. 7.7** Ein Polizist in Bangkok winkt dem Fahrzeug zum Abbiegen



**Abb. 7.8** Ein Polizist in Schweden fordert das Fahrzeug zum Nachrücken auf





## 7.5 Auswirkungen der Kommunikationsmöglichkeit auf die Akzeptanz autonomer Fahrzeuge

Unter dem Gesichtspunkt der Akzeptanz muss man sich nochmal den Effekt der informellen Kommunikation in „Verhandlungssituationen“ vergegenwärtigen. Diese dient unter Berücksichtigung von § 1 der STVO zur Auflösung von Situationen, die zwar prinzipiell geregelt sind, bei denen die Befolgung der Regel aber zu einer erheblichen Störung des Verkehrs führen würde.

### Beispiel 1

Wegen eines parkenden oder liegen gebliebenen Fahrzeugs in der eigenen Fahrspur ist es erforderlich, auf die Gegenfahrbahn zu fahren und dabei im Extremfall eine durchgezogene Linie zu überfahren. Bei dichtem Gegenverkehr erfordert das eine Abstimmung mit dem Gegenverkehr. Abgesehen von dem (verbotenen) Überfahren der durchgezogenen Linie kann die Situation ohne „Verhandlung“ gelöst werden, wenn der Gegenverkehr so stark abnimmt, dass die Benutzung des anderen Fahrstreifens auch ohne Verständigung zwischen den Fahrzeugen möglich ist. Mit zunehmender Verkehrsdichte wird eine Verhandlung mehr und mehr erforderlich.

Wie signalisiert der Gegenverkehr seine Kooperationsbereitschaft? Er muss zum einen verzögern, um eine prinzipielle Möglichkeit zum Ausscheren auf die Gegenfahrbahn zu eröffnen. Verzögern allein reicht meist als Signal nicht aus, denn es kann viele Gründe geben, warum ein Fahrzeug eine etwas größere Lücke zum Vorausfahrenden herstellt. Deshalb zeigt der Gegenverkehr in der Regel seine Absicht durch Verzögern und zusätzlich durch die Betätigung der Lichthupe an. Erkennt nun das autonome Fahrzeug dieses Signal nicht, so wird es als „Verkehrshindernis“ betrachtet, was für die Akzeptanz sicher nicht günstig ist.

### Beispiel 2

Autonome Fahrzeuge werden sich, wie eben gezeigt, primär vorsichtiger verhalten als menschliche Autofahrer, da sie wenig Wissen über den Kontext und informelle Zeichen besitzen. Sie können aber auch Manöver fahren, die von einem menschlichen Fahrer normalerweise nicht ausgeführt werden. Im Gegensatz zu menschlichen Autofahrern reagieren sie schneller, d. h., die als „Schrecksekunde“ bezeichnete Reaktionszeit des Menschen entfällt weitestgehend. Dies ist einer der Gründe, warum autonome Fahrzeuge weniger Unfälle verursachen würden. Weiterhin ist aus der Unfallforschung bekannt, dass viele Fahrer das Verzögerungspotenzial ihrer Fahrzeuge nicht voll ausschöpfen und auch beim Ausweichen die physikalischen Grenzen entlang des Kamm'schen Kreises im Allgemeinen nicht erreichen. Fahrer-Assistenz-Systeme wie automatische Notbremse oder Ausweichassistent wollen diese Defizite kompensieren. In Notsituationen könnte also ein autonomes Fahrzeug nicht nur schneller, sondern auch an den physikalischen Grenzen der Längs- und Querschleunigung agieren. Wie sich das auf andere Verkehrsteilnehmer auswirkt, ist momentan weitgehend unbekannt. Ein einfacher Lösungsansatz wird in Abschn. 7.6 diskutiert.

## **7.6 Mit welchem mentalen Modell werden andere Verkehrsteilnehmer auf Fahrfehler von autonomen Fahrzeugen reagieren?**

Nahe verwandt mit der vorher genannten Interaktion und Verhandlung ist die Kompensation von Fehlern anderer Verkehrsteilnehmer. Neben der Vermeidung von unmittelbaren Kollisionen durch Ausweichtrajektorien gehört die Toleranz der Fahrfehler anderer zum alltäglichen Straßenverkehr. Zunächst muss geklärt werden, was unter „Fahrfehlern“ zu verstehen ist. Fahrfehler können aus Sicht eines menschlichen Fahrers streng regelkonformes, aber situationsangepasst nicht optimales Verhalten darstellen.

So kann beispielsweise ein Fahrzeug mit einem menschlichen Fahrer, das sich auf einer bevorrechtigten Straße befindet, das autonome Fahrzeug aus der untergeordneten Straße zunächst passieren lassen, weil es sonst nicht in die untergeordnete Straße einbiegen könnte. Der menschliche Fahrer würde also auf sein regelkonformes Vorfahrtsrecht verzichten, was vom autonomen Fahrzeug sicher erkannt werden müsste.

Fahrfehler können aber auch Defizite im Verhaltensrepertoire des autonomen Fahrzeugs zur Lösung spezieller Situationen oder das Erreichen von Systemgrenzen sein.

### **Beispiel**

Ein autonomes Fahrzeug geht im Modus „Staupilot“ in einen sicheren Zustand, weil die Systemgrenzen erreicht sind. Das bedeutet: Das Fahrzeug bremst in den Stillstand. Obwohl prinzipiell das Bremsen bis in den Stillstand im Stau häufig vorkommt, werden die übrigen Verkehrsteilnehmer zumindest verwirrt sein, wenn alle anderen Fahrzeuge fahren und nur das autonome stehen bleibt. Erfolgt das Manöver relativ abrupt und (für andere) aus nicht ersichtlichem Grund, so kann daraus eine Gefährdung entstehen. Allerdings sollte man berücksichtigen, dass sich im aktuellen Straßenverkehr Verkehrsteilnehmer auch nicht fehlerlos verhalten und ihre Fehler meist durch andere kompensiert werden. Somit stellt sich die Frage: Welche Eigenschaften weisen Menschen den autonomen Fahrzeugen zu. Werden sie eher als weniger kompetent im Vergleich zu menschlichen Fahrern eingeschätzt, oder gelten sie als perfekt funktionierende Automaten?

Ziel einer Einführungsstrategie muss die Prägung eines positiven und zugleich realistischen Bildes autonomer Fahrzeuge im Bewusstsein aller Verkehrsteilnehmer sein. Dann, und nur dann werden autonome Fahrzeuge einen adäquaten Platz im System Verkehr einnehmen. Die Voraussetzungen hierfür sind prinzipiell gegeben. So ist aus Umfragen zu neuen Technologien wie etwa der Robotik bekannt, dass Europäer eine positive Einstellung gegenüber Robotern aufweisen [12]. Auch Fahrerassistenzsysteme, als Vorstufe zu hochautomatisierten und schließlich autonomen Fahrzeugen, erfreuen sich mittlerweile eines hohen Ansehens als nützliche Helfer und werden zunehmend von den Käufern nachgefragt [13].

Neben der Einstellung gegenüber technischen Systemen ist die Zuweisung von Fähigkeiten und Eigenschaften neuer technischer Systeme vom Wissensstand der Nutzer abhängig. Naive Verhaltensmodelle von technisch nicht versierten Personen weisen technischen

Systemen in der Regel mehr Fähigkeiten zu, als sie wirklich besitzen. Die aktuelle, vor allem marketingorientierte Demonstration von autonomen Fahrzeugen in den Medien vermittelt den Eindruck, dass diese Fahrzeuge alle Situationen beherrschen können. Damit werden die Erwartungen an autonome Fahrzeuge so hoch, dass Fahrfehler zumindest zur Irritation, wenn nicht zu Sicherheitsproblemen führen. Um ein realistisches Verständnis für mögliche Probleme zu erzeugen, ist es daher essenziell, frühzeitig zu vermitteln, wo die Fähigkeiten und die Grenzen autonomer Fahrzeuge liegen.

---

## 7.7 Kulturelle Unterschiede

Im Zusammenhang mit kulturellen Unterschieden stellen sich verschiedene Fragen: Gibt es universelle Grundregeln für nonverbales Verhalten, die nur adaptiert werden müssen? Wie lassen sich kulturelle Unterschiede in der Kommunikation und der Erwartungshaltung auf das Kommunikations- und Entscheidungsverhalten eines Fahrroboters übertragen? Wenn ja, wie lassen sich diese adaptieren? Welche Verhaltensweisen gibt es im internationalen Vergleich?

Die bekanntesten kulturvergleichenden sieben Studien zu nonverbalen Äußerungen anhand des Gesichtsausdrucks stammen von Paul Ekman [14]. Er fand kulturübergreifend einheitliche Gesichtsausdrücke für die Basisemotionen Angst, Ekel, Freude, Trauer, Überraschung, Wut und Verachtung.

Die meisten dieser Basisemotionen treten zwar auch im Straßenverkehr auf, die Bedeutung für die Kommunikation mit anderen ist aber nur von eingeschränkter Wichtigkeit. Eine besondere Bedeutung hat der Ja/Nein-Code in Verhandlungssituationen. In Mittel- und Nordeuropa und den USA gilt Kopfnicken als Bejahung und Kopfschütteln als Verneinung. Im Gegensatz dazu wird in Indien, Pakistan, aber auch in Bulgarien das Kopfwackeln von Schulter zu Schulter, das dem „Nein“ in Europa und USA ähnelt, für „Ja“ verwendet. Schließlich gibt es noch eine Art, Ja und Nein nonverbal anzuzeigen, die in Griechenland, der Türkei und Süditalien verbreitet ist. Das „Ja“ wird durch eine Fallbewegung des Kopfes nach vorne ausgedrückt, für ein „Nein“ wird der Kopf in den Nacken geworfen ([15], S. 134). Missverständlich für die Interaktion zwischen Verkehrsteilnehmern kann auch noch das Heranwinken mit einer Handgeste sein. Die sogenannte „Paddelgeste“ [15] mit nach unten gerichteter Handfläche dient in Japan und im Mittelmeerraum zum Heranwinken. In England und Deutschland wird sie eher in der Bedeutung „Geh weg!“ eingesetzt. Trotz kultureller Unterschiede nonverbaler Zeichen, die mit den Händen ausgeführt werden, sind interessanterweise speziell diejenigen Zeichen, die zur Beschimpfung anderer im Straßenverkehr dienen, international weitgehend einheitlich. Der erhobene Zeigefinger (s. Abb. 7.9), das Tippen an die Stirn (s. Abb. 7.10) oder das Vorbeiwischen an der Stirn (s. Abb. 7.11) zum Ausdruck von Unverständnis für das Verhalten zeigen dem anderen an, was man von ihm hält bzw. nicht hält. Einzig der vertikale Kreis aus Zeigefinger und Daumen mit abgespreizten restlichen Fingern bedeutet in Deutschland (meist) „o.k.“ oder Lob, während es in Italien „Arschloch“ bedeutet (s. Abb. 7.12).

**Abb. 7.9** Erhobener Finger



**Abb. 7.10** Verärgerung ausdrücken



**Abb. 7.11** Vorbeiwischen an der Stirn zum Ausdruck von Unverständnis mit dem Verhalten des anderen



**Abb. 7.12** Alles gut!

Im Gegensatz zu den kulturübergreifenden Basisemotionen „Ärgerzeichen“ existieren für die informelle Kommunikation zwischen Verkehrsteilnehmern sicherlich kulturelle Unterschiede, die sich im Fahrverhalten ausdrücken und auch einem Wandel unterworfen sind.

Nach allgemeiner Ansicht fahren Südeuropäer dynamischer und zugleich defensiver als Mitteleuropäer. Als informelle Signale zwischen den Fahrzeugen dienen in Südeuropa vor allem die Beschleunigung und die Hupe. Ein Fahrer, der mit einer starken Beschleunigung (eventuell unter Verwendung der Hupe) in eine Lücke einschert, erwartet, dass die anderen Verkehrsteilnehmer nachgeben. Er erwartet aber auch keine weitere Rückmeldung, sondern geht davon aus, dass seine Absicht erkannt und akzeptiert wird.

In Mittel- und Nordeuropa wird der Fahrer des einscherenden Fahrzeugs eher eine Rückmeldung erwarten, zumindest in Form von Blickkontakt oder als Nicken oder Handzeichen. Umgekehrt ist – zumindest in Deutschland – das Beharren auf dem Vorfahrtsrecht verbreitet, sodass ein Einschermanöver ohne das Einholen des „Einverständnisses“ eines anderen Verkehrsteilnehmers selten ist, da ansonsten die Gefahr einer Kollision droht.

Der Verkehr in USA ist durch gleichmäßiges und spurbezogenes Fahren gekennzeichnet. Hier spielen, abgesehen von den offiziellen Zeichen, informelle Zeichen eine geringere Rolle.

In China ist der Verkehr – zumindest bislang – durch eine geringe Regelbefolgung und eine für Ausländer schwer zu durchschauende Kommunikation geprägt. Chinesische Autofahrer sind Meister der Überraschung, ignorieren Verkehrsregeln, Hupen gilt nur als „freundlicher Gruß“ [16].

Von besonderer Bedeutung ist die Kommunikation zwischen Autos und Fußgängern. Die Verständigung erfolgt hier durch Handzeichen, Betreten des Überwegs oder aber auch Warten am Zebrastreifen, bis die Autos anhalten. Welche Auswirkungen hat das auf das Verhalten von autonomen Fahrzeugen? Zum einen werden autonome Fahrzeuge aufgrund der Trajektorie und Beschleunigung des Fußgängers vorhersagen, ob eine Kreuzungs-

absicht besteht oder nicht. Darüber hinaus gibt es andere Verhaltensweisen, die weniger eindeutig sind: Stehen am Überweg ohne Kreuzungsabsicht (z. B. weil man sich unterhalten will) oder zögerliches Verhalten, das keine eindeutige Querungsabsicht erkennen lässt. In all diesen Fällen würde das autonome Fahrzeug aus Sicherheitsgründen anhalten. Die Konsequenzen sind einerseits „unberechtigtes Anhalten“ bzw. die Gefahr, dass beispielsweise Kinder oder Jugendliche einen neuen Sport entwickeln, Fahrzeuge am Zebrastreifen zum Anhalten zu zwingen.

Allerdings sind die gesetzlichen Regelungen und auch die tatsächlichen Verhaltensweisen zwischen Ländern sehr unterschiedlich. Während beispielsweise in Italien bis vor einigen Jahren kein Anhaltegebot für Autos am Zebrastreifen galt, ist es jetzt eingeführt worden. Nach Berichten von China-Reisenden ist es nur empfehlenswert, den Zebrastreifen als Fußgängerpulk zu überqueren, weil man als Einzelner keine Chance hat.

Fußgänger, die sich mit Handzeichen verständigen, gehen davon aus, dass die Handzeichen gesehen werden – sie werden aber in der Regel ohne Beachtung der Verzögerung des Verkehrs die Straße nicht überqueren.

---

## 7.8      Kompensationsmöglichkeiten

Die mangelnden Fähigkeiten von Fahrrobotern zur informellen Kommunikation in „Verhandlungssituationen“ ließen sich im ersten Schritt auf einfache Weise lösen.

Durch die eindeutige und sichtbare Kennzeichnung autonomer Fahrzeuge könnte den übrigen Verkehrsteilnehmern die Besonderheit der Fahrzeuge und ihr abweichendes Verhalten verdeutlicht werden. Dies würde anderen Verkehrsteilnehmern zeigen, dass sie nicht das gewohnte Verhalten erwarten können, und in der Folge auch die Akzeptanz in den oben beschriebenen Beispiel-Situationen erhöhen. Auch Fahrschulfahrzeuge sind ja besonders kenntlich gemacht, um andere Verkehrsteilnehmer zu informieren und um Verständnis für ein entweder sehr regelkonformes oder aber unsicheres Verhalten zu bitten.

Für die Kennzeichnung spricht speziell in der Einführungsphase einiges. Wenn – wie in dem Szenario „Valet-Parken“ (s. Kap. 2) vorgesehen – Fahrzeuge ohne Person auf dem Fahrersitz fahren, so kann dies bei den übrigen Verkehrsteilnehmern zu Irritationen führen. „Bewegt sich das Fahrzeug autonom, oder ist es unkontrolliert unterwegs?“ Durch die Kennzeichnung stellt sich diese Frage nicht. Die Kennzeichnung von autonomen Fahrzeugen kann zudem einen Marketingeffekt haben, der eine schnelle Verbreitung zur Folge hat. So gab es beispielsweise bei der Einführung von ABS Aufkleber für die Heckscheibe mit dem Hinweis „Dieses Fahrzeug hat ABS“, um anzuzeigen, dass der Bremsweg kürzer ist. Technisch gesehen ist das zwar nicht korrekt, da ABS vor allem die Lenkfähigkeit beim Bremsen erhält, aber unter Marketinggesichtspunkten war der Aufkleber ein Erfolg.

Es spricht aber auch einiges gegen die spezielle Kennzeichnung von autonomen Fahrzeugen. Da sie sich, u. a. wegen ihrer eingeschränkten Verhandlungsfähigkeit, absolut regelkonform verhalten müssen, können sie auch Ziel von unerwünschten Eingriffen von außen sein.

### Ein einfaches Beispiel

Ein Fußgänger würde eine Straße nicht überqueren, wenn sich ein Auto nähert, da er nicht sicher ist, ob er vom Fahrer gesehen wird und ob der Fahrer bremst bzw. anhält. Bei einem autonomen Fahrzeug kann sich der Fußgänger darauf verlassen, dass das Fahrzeug (unter Berücksichtigung der physikalischen Grenzen) in jedem Fall anhalten wird. Das Stoppen autonomer Fahrzeuge könnte also durchaus ein Sport für Jugendliche werden bzw. Erwachsene dazu verleiten, ohne Rücksicht auf den fließenden Verkehr, die Straße zu überqueren. „Der muss ja anhalten – so ist er programmiert“. Beides ist für den Verkehrsfluss nicht günstig und wird die Akzeptanz autonomer Fahrzeuge nicht positiv beeinflussen.

Ob der Negativeffekt eintritt, ist schwer vorherzusagen. Es hängt sicher stark von der Art und Weise der Einführung autonomer Fahrzeuge ab. Gelten sie als positive technische Neuerung, der man gewisse Schwächen verzeiht, so dürfte der Negativeffekt kaum auftreten. Gelten sie hingegen als Statussymbol für Privilegierte, so wird der „Neidfaktor“ überwiegen und Versuche, das System zu stören, werden gehäuft auftreten.

---

## 7.9 Neue Kommunikationsformen für einen effektiven Informationsaustausch aus psychologischer und technischer Sicht

Prinzipiell muss ein autonomes Fahrzeug Gesten bzw. Trajektorien anderer Verkehrsteilnehmer erkennen und interpretieren können. Zur Interpretation benötigt es Situationswissen, um die Zeichen richtig zu deuten. Für die Informationsübermittlung zu anderen Fahrzeugen oder Verkehrsteilnehmern dürften für die meisten Situationen die „offiziellen“ Signale wie Blinker, Hupe und Lichthupe ausreichend sein.

Ein interessanter Ansatz zur Kommunikation zwischen autonomen Fahrzeugen und Fußgängern stammt von der Forschungsgruppe um Kent Larsen vom MIT [17]. In einem Prototyp mit Multisensorik, der allerdings nur entfernt einem realen Fahrzeug ähnelt, wurden mehrere Aktoren eingebaut. Schwenkbare und blinkende LEDs, die wie ein Auge aussehen, wenden sich dem Fußgänger zu und signalisieren ihm: „Ich habe dich gesehen.“

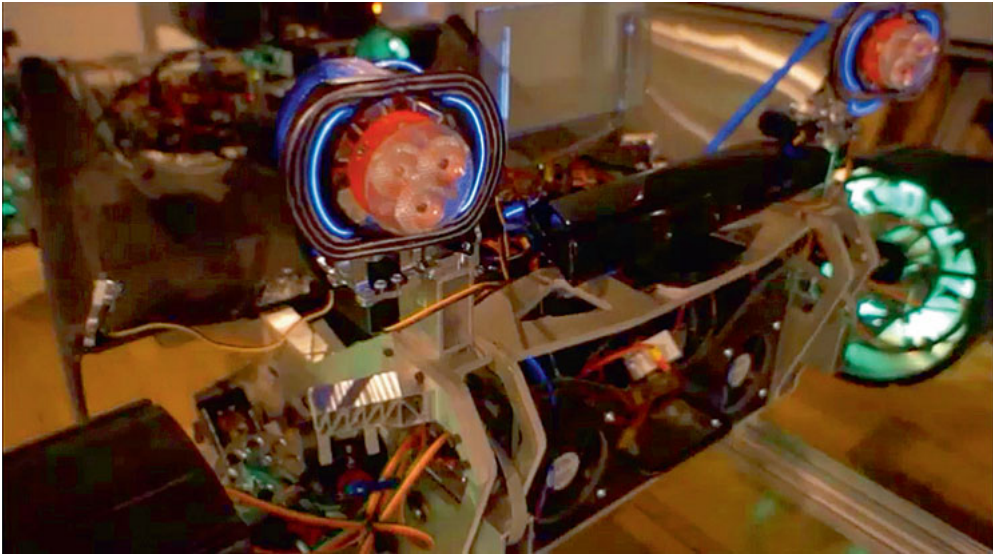
Zusätzlich schwenken gerichtete Lautsprecher zum Fußgänger und sagen ihm, dass er die Straße überqueren kann.

Werden Fußgänger entdeckt, so können LEDs in den Rädern, die die Farbe von Grün zu Orange und Rot ändern, den Fußgängern anzeigen, dass sie erkannt wurden, um sie zu warnen (s. Abb. 7.13).

Ein weiteres Signal, das von autonomen Fahrzeugen an andere ausgesendet werden kann, besteht im „deutlichen Fahren“.

Will beispielsweise ein autonomes Fahrzeug mit einem anderen kooperieren (z. B. Öffnen einer Lücke zum Einscheren), so müsste es deutlich verzögern, um die Lücke erkennbar zu machen und dem anderen Fahrer die Sicherheit zu vermitteln, dass ein gefahrloses Einscheren möglich ist.

Kommunikation und informelle Regeln unterliegen einem permanenten Wandel. Auf der verbalen Ebene lässt sich das eindrücklich an dem Wort „geil“ nachvollziehen. Spätes-



**Abb. 7.13** AEVITA: Autonomous Electric Vehicle Interaction Testing Array

tens seit „Geiz ist geil“ hat dieser Begriff aus der Jugendsprache eine völlig andere Bedeutung bekommen. Auch das nonverbale Signal wie der nach oben gestreckte Daumen für „gefällt mir“ ist über die neuen Medien zum aktuellen Standard geworden. Das bedeutet zum einen, dass autonome Fahrzeuge immer wieder neue Zeichen nonverbalen Verhaltens lernen müssten, d. h., ein regelmäßiges Update des Zeichenvorrats und dessen Bedeutung ist erforderlich. Es ist aber auch ein anderer Effekt zu erwarten: Durch die Zunahme autonomer Fahrzeuge mit einem anderen, vor allem an formalen Regeln orientierten Verhalten am Straßenverkehr dürften auch die übrigen Verkehrsteilnehmer dieses Verhalten übernehmen. Damit wird der Verkehr stärker normiert, aber deshalb nicht unbedingt flüssiger ablaufen. Flexible Kooperation zwischen Verkehrsteilnehmern bekommt vor allem bei dichtem Verkehr eine steigende Bedeutung. Die Abstände werden geringer, die Dynamik erhöht sich und die Beachtung von informellen Regeln steigt an.

Eine weitere technische Lösung könnte Car2Car-Kommunikation darstellen. Sie setzt voraus, dass die betreffenden Verkehrsteilnehmer – also nicht nur die autonomen Fahrzeuge – mit der entsprechenden Technik ausgerüstet sind. Car2Car-Kommunikation wird schon lange beforscht, und es existiert eine Reihe von Demonstrationen, auch in größeren Testfeldern, wie etwa simTD [18]. In der Verbreitung von Car2Car (V2V) oder Car-to-X/V2X (Car to Infrastructure/Vehicle to Infrastructure) könnte ein wesentlicher Lösungsansatz für die Kommunikationsprobleme zwischen autonomen Fahrzeugen und menschlichen Fahrern bestehen.

Frost und Sullivan [19] gehen davon aus, dass bis zum Jahr 2030 40 Prozent der Fahrzeuge mit V2V- bzw. V2X-Technologie ausgestattet sind, da sich die Nutzer davon große Vorteile wie weniger Staus und eine höhere Sicherheit versprechen. Somit könnte die



zügige Verbreitung dieser Technik, die zunächst etwas anderes im Fokus hat, Kommunikationsprobleme zwischen autonomen und von Menschen gesteuerten Fahrzeugen mildern.

Jedoch werden auch dann noch unauflösbare Situationen für autonome Fahrzeuge entstehen, entweder, weil die anderen Verkehrsteilnehmer nicht über die entsprechende Kommunikationseinrichtung verfügen, oder die Situation durch einfache Kommunikation nicht aufzulösen ist. Führt das autonome Fahrzeug ohne Fahrer, der in diesen Fällen die Fahraufgabe kurzzeitig (aber nicht kurzfristig) übernehmen kann, so muss eine übergeordnete Leitstelle eingreifen.

---

## 7.10 Fazit

Sind die Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikationsmöglichkeiten heute noch sehr beschränkt und wenig verlässlich, so wird gerade mit ungeschützten Verkehrsteilnehmern die Kommunikation mit Blicken, mit Aktionen und Aktionsreihenfolgen vielfältig genutzt. Je nach mentaler Situation wird mehr oder weniger intensiv miteinander verhandelt, z. B. beim Überschreiten des Fußgängerüberwegs. Die dabei angewandten Regeln sind stark kulturell geprägt, insbesondere die Erwartungshaltung an das Gegenüber wird in verschiedenen Kulturen unterschiedlich gesehen, sodass sich keine allgemein gültigen Regeln für den Fahrroboter ableiten lassen. Ein weiteres Problem entsteht allein aus der Nichterkennbarkeit des aktiven Fahrzeugführers, des Roboters. Dies ist zumindest bei fahrerlosen Fahrzeugen offensichtlich. Ist der Fahrerplatz des autonom fahrenden Fahrzeugs aber besetzt, so wird die Kommunikation voraussichtlich falsch adressiert. Ohne Blick- und Gestenerkennung von anderen Verkehrsteilnehmern wird ein Mischverkehr schwierig. Dies gilt vor allem für den Niedergeschwindigkeitsbereich. Mit zunehmenden Geschwindigkeiten nimmt die Bedeutung dieser Kommunikation aus verschiedenen Gründen ab, denn

- sie ist nicht ein-eindeutig,
- sie verlangt vom Partner eine Rückmeldung und dauert daher bei höheren Geschwindigkeiten zu lange,
- die Erfassung durch den anderen Verkehrsteilnehmer ist bei höheren Geschwindigkeiten eingeschränkt, z. B. ist das Blickverhalten in der Kürze der Zeit nicht gut zu erfassen.

Welche Anforderungen ergeben sich daraus für die Absicherung der auf Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmern basierenden Funktionalität?

Autonome Fahrzeuge müssen sich somit zunächst so verhalten, als gäbe es keine informelle Kommunikation, also komplett regelkonform. Im Falle einer unauflösbaren Situation muss die Fahraufgabe an einen menschlichen Fahrer übergeben werden. Ist kein menschlicher Fahrer vorhanden, so muss eine Leitzentrale in das autonome Fahrzeug eingreifen. Das Verkehrsmanagement würde analog zum Luftverkehr gestaltet, bei dem eine zentrale Leitstelle alle Flug- und Rollbewegungen steuert. An die Stelle des Piloten,

der Befehle der Leitstelle ausführt, tritt dann der Fahrroboter, der Befehle auf der Manöverebene erhält und diese Aktionen selbstständig auf der Stabilisierungsebene ausführt. Ungeklärt ist dabei noch, wie ein autonomes Fahrzeug erkennen soll, dass die Situation unauflösbar ist und die Leitstelle verständigt werden muss.

---

## Literatur

1. archive.darpa.mil/grandchallenge/ zuletzt besucht am 25.7.2014
2. Ziegler, J., Bender, P., Lategahn, H., Schreiber, M., Strauß, T., Stiller, C. (2014). Kartengestütztes automatisiertes Fahren auf der Berta-Benz-Route von Mannheim nach Pforzheim. FAS 2014, Uni-DAS, S. 97–94
3. Saust, F., Wille, J.M., Lichte, B., Maurer, M. (2011). Autonomous Vehicle Guidance on Braunschweig's inner ring road within the Stadtpilot Project. In: Intelligent Vehicles Symposium (IV), Baden-Baden. S. 169–174
4. Merten, K. (1977). Kommunikationsprozesse im Straßenverkehr. In: Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg) Symposium 77. Köln: Bundesanstalt für Straßenwesen
5. Darwin, C. (1874). Der Ausdruck der Gemüthsbewegungen beim Menschen und den Thieren. Halle
6. Pfungst, O. (1907). Das Pferd des Herrn von Osten (Der kluge Hans). Leipzig
7. Schmidt, S., Färber, B. (2009). Pedestrians at the kerb – Recognising the action intentions of humans. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behavior, 12, S. 300–310
8. Risser, R. (1988). Kommunikation und Kultur des Straßenverkehrs. Wien
9. Heidegger, M. (1927). Sein und Zeit. Tübingen. 11. Auflage 1967
10. Frerichs, K. (1995). Der Winker und das Winken: Ein zeichenphänomenologischer Passus in Martin Heideggers Sein und Zeit. Zeitschrift für Semiotik, Band 17, Heft 1–2. S. 133–142
11. Savigny, E.v. (1995). Autofahrerzeichen: Funktion, Systeme, Autonomie. Zeitschrift für Semiotik, Band 17, Heft 1–2. S. 105–128
12. Special Eurobarometer 382, Public Attitudes Towards Robots, Report Sept. 2012
13. Continental Mobilitätsstudie <http://www.pressebox.de/pressemitteilung/continental-reifen-deutschland-gmbh-hannover/Deutsche-Autofahrer-wollen-Automatisiertes-Fahren-fuer-die-Autobahn/boxid/647170> zuletzt besucht am 26.8.2014
14. Ekman, P. (1975). Universals and Cultural Differences in Facial Expressions of Emotion. In: J. Cole (Hrsg.): Nebraska Symposium on Motivation 1971. Bd. 19, University of Nebraska Press, Lincoln
15. Broszinsky-Schwabe, E. (2011). Interkulturelle Kommunikation: Missverständnisse – Verständigung. VS Verlag, Wiesbaden
16. <http://www.auto-motor-und-sport.de/news/autofahren-in-china-ein-mann-sieht-rot-5957313.html> zuletzt besucht am 7.8.2014
17. <http://www.technologyreview.com/view/427743/how-do-you-know-an-autonomous-vehicle-has-seen-you/> zuletzt besucht am 8.9.2014
18. simTD deliverable D5.5 (2013) [http://www.simtd.de/index.dhtml/object.media/deDE/8154/CS/-/backup\\_publications/Projektergebnisse/simTD-TP5-Abschlussbericht\\_Teil\\_A\\_Manteldokument\\_V10.pdf](http://www.simtd.de/index.dhtml/object.media/deDE/8154/CS/-/backup_publications/Projektergebnisse/simTD-TP5-Abschlussbericht_Teil_A_Manteldokument_V10.pdf)
19. Strategic Analysis of the European Market for V2V and V2I Communication Systems (2014) zitiert nach <http://www.frost.com/prod/servlet/press-release.pag?docid=290129681>

Barbara Lenz, Eva Fraedrich

Wird autonomes Fahren die Mobilität der Menschen verändern? Werden wir in der Zukunft anders mobil sein als heute? Wie wird der Weg in die Zukunft der Mobilität überhaupt aussehen? Und welche Gedanken müssen sich Verkehrs- und Stadtplanung für die mit autonomen Fahrzeugen verwirklichte Mobilität von morgen machen? – Solche Fragen aus dem Teil „Mobilität“ haben zum Ziel, erste fundierte Überlegungen zu einer Alltagswelt zu diskutieren, in der autonomes Fahren einen wesentlichen Bestandteil des Verkehrssystems bildet. Die Autorinnen und Autoren der sieben nachfolgenden Kapitel widmen sich denjenigen Aspekten, die für die Realisierung einer „autonomen Mobilität“ der Zukunft eine besondere Herausforderung darstellen.

Die Gestaltung des Rahmens, in den solche (Mobilitäts-)Entwicklungen gestellt sind, ist eine Aufgabe, der sich die Politik erst ganz allmählich zuwendet. Miranda Schreurs und Sibyl Steuwer zeigen im Kapitel *Autonomous Driving – Political, Legal, Social, and Sustainability Dimensions*, welche Initiativen heute schon seitens politischer Akteure nicht nur in Deutschland, sondern auch in der EU und den USA angeregt wurden. Sie machen deutlich, wie sowohl industrielle als auch politische Ziele und Interessen die Vorgehensweise dieser Akteure leiten und dabei vor allem langfristige Perspektiven verfolgen. Gleichzeitig plädieren die Autorinnen dafür, die Debatte um autonome Fahrzeuge und das autonome Fahren auf eine breite Basis zu stellen, die neben technischen und rechtlichen Fragen auch der gesellschaftlichen Relevanz dieser neuen Technologie Rechnung trägt.

In ihrem Beitrag *Neue Mobilitätskonzepte und autonomes Fahren: Potenziale der Veränderung* setzen sich Barbara Lenz und Eva Fraedrich mit der Frage auseinander, wie neue Mobilitätskonzepte, z. B. Carsharing, aber auch der öffentliche Verkehr sich verändern könnten, wenn autonome Fahrzeuge in diese Konzepte integriert würden. Sie identifizieren eine möglicherweise sehr weitgehende Flexibilisierung der Systeme, aber auch Ansatzpunkte zur Individualisierung des öffentlichen Verkehrs, und kommen zu dem Schluss, dass autonome Fahrzeuge ein erhebliches, erst allmählich sichtbar werdendes Potenzial für die Umgestaltung des Verkehrssystems und die Steigerung der Attraktivität von öffentlichen

Systemen bieten. Gleichzeitig verweisen sie aber auch darauf, dass solche Entwicklungen an den Kosten und der Rentabilität dieser neuen Systeme zu messen sein werden.

Mögliche Wege zur konkreten Einführung autonomer Fahrzeuge sind Gegenstand des Beitrags *Einführungsszenarien für höhergradig automatisierte Straßenfahrzeuge* von Sven Beiker. Der Autor unterscheidet drei Szenarien auf dem Weg zum autonomen Fahrzeug: (1) ein evolutionäres Szenario, (2) ein revolutionäres Szenario und (3) ein transformatives Szenario und prüft sie hinsichtlich ihrer Wirkung auf das Verkehrssystem, des technischen Entwicklungsbedarfs, der regulatorischen Anforderungen sowie der Bedeutung für Unternehmensstrategien. Er kommt zu dem Schluss, dass die genannten Szenarien derzeit noch völlig unverbunden sind und es nicht unwahrscheinlich ist, dass die Entwicklung zum autonomen Fahren zunächst in unterschiedlichen Anwendungsfeldern vor sich geht, die erst allmählich „zusammenwachsen“.

Was bedeutet es eigentlich für unsere Städte, wenn autonome Fahrzeuge im Straßenverkehr unterwegs sind? Dirk Heinrichs lotet in seinem Beitrag *Autonomes Fahren und Stadtstruktur* aus, welche Auswirkungen ein automatisierter Straßenverkehr auf die Stadt und ihre (Raum-)Struktur haben könnte. Dazu untersucht er aktuell gängige Szenarien zur Stadt der Zukunft im Hinblick auf die Vorstellungen, die dort für den Verkehr entwickelt werden, insbesondere unter der Annahme eines voll automatisierten Straßenverkehrs. Er zeigt auf, welche positiven, aber auch negativen Wirkungen grundsätzlich denkbar sind. In jedem Fall, so folgert Heinrichs, ist es Aufgabe einer integrierten Stadt- und Verkehrsplanung, sich rechtzeitig mit den Herausforderungen auseinanderzusetzen, die mit dem autonomen Fahren verbunden sind, und dabei vor allem Zusammenhänge zwischen längerfristigen und alltäglichen Mobilitätsentscheidungen in den Blick zu nehmen.

Um künftige Entwicklungen im Bereich Mobilität und Verkehr hinsichtlich ihrer Auswirkungen, aber auch ihrer Steuerbarkeit abschätzen zu können, benötigen Verkehrs- und Stadtplaner quantitative Modelle. Ein wichtiges Element stellen hier sogenannte Nachfragemodelle dar, die z. B. abbilden könnten, wie sich die Veränderung der Autonutzung – nämlich gefahren werden anstatt selbst zu fahren – auf die Mobilität der Menschen auswirkt. Gegenwärtig ist die Entwicklung solcher Modelle aber noch schwierig, da empirische Werte zum Verkehrsverhalten von Menschen angesichts einer Automatisierung des Fahrens nicht vorhanden sind. In ihrem Beitrag *Autonome Fahrzeuge und autonomes Fahren aus Sicht der Nachfragemodellierung* diskutiert Rita Cyganski die in der Nachfragemodellierung vorhandenen Aufgaben und Möglichkeiten zur Integration von autonomem Fahren. Auf Basis einer Befragung zeigt sie darüber hinaus, dass vereinfachende Annahmen zur Vorteilhaftigkeit des Gefahrenwerdens zumindest aktuell nicht realistisch sind und damit auch keinen geeigneten Ansatzpunkt für die Nachfragemodellierung darstellen.

Ein wesentlicher Einfluss auf die Verkehrsnachfrage geht nicht zuletzt von den Fahrzeugen aus, mit denen die Nachfrage bedient werden kann. Hermann Winner und Walther Wachenfeld beschreiben im Kapitel *Auswirkungen des autonomen Fahrens auf das Fahrzeugkonzept*, welche Möglichkeiten für eine Veränderung des Fahrzeugkonzeptes in den Bereichen Karosserie, Antrieb, Fahrwerk, Innenraum und Mensch-Maschine-Schnittstelle

(MMS) bestehen und wie sich die Fahrzeuge selbst und ihre Nutzbarkeit dadurch verändern könnten. Die Autoren vermuten, dass die Automation kein Treiber einer Revolution der Fahrzeugkonzepte sein wird. Gleichwohl sehen sie erhebliche Möglichkeiten der weiteren zweckspezifischen Ausdifferenzierung der Fahrzeuge, die nicht zuletzt dadurch zustande kommen könnte, dass die Nutzerinnen und Nutzer das Fahrzeug auf neue Art und Weise einsetzen – vielleicht sogar als rollendes Wohn-, Arbeits- oder Schlafzimmer.

Autonome Fahrzeuge werden möglicherweise nicht nur als Individualfahrzeuge genutzt werden, sondern auch Teil von Personentransportsystemen sein. Diese Systeme könnten autonom auf der Straße unterwegs sein und auch automatisiert zur Verfügung gestellt werden. Mit dem Beitrag *Implementierung eines selbstfahrenden und individuell abrufbaren Personentransportsystems* zeigt Sven Becker zunächst auf, welche grundsätzlichen Fragestellungen hierbei zu beantworten sind, und stellt dann die derzeit aktuelle Implementierung eines solchen Systems auf dem Gelände der Stanford University in Kalifornien vor. Damit liefert dieses Kapitel ein anschauliches Beispiel für die konkrete Einführung eines Straßenfahrzeugs in einem zwar kontrollierten, aber dennoch öffentlichen Raum.

---

# Autonomous Driving – Political, Legal, Social, and Sustainability Dimensions

Miranda A. Schreurs, Sibyl D. Steuer

## Content

<b>8.1 Introduction</b> .....	152
<b>8.2 Autonomous driving from an innovation policy perspective</b> .....	152
<b>8.3 Visions of autonomous driving in Europe</b> .....	154
8.3.1 European Strategy Documents .....	155
8.3.2 Research related to autonomous driving (EU) .....	158
8.3.3 Actors and arenas for autonomous driving in the EU .....	160
<b>8.4 National and international legislative and political developments</b> .....	161
8.4.1 Regulatory Changes to the United Nations Convention on Road Traffic (Vienna Convention) .....	161
8.4.2 USA .....	162
8.4.3 Japan .....	164
8.4.4 United Kingdom .....	164
8.4.5 Sweden .....	164
8.4.6 Germany .....	165
<b>8.5 Analysis</b> .....	168
<b>8.6 Conclusion</b> .....	170
<b>References</b> .....	170

---

M. Schreurs (✉)

Freie Universität Berlin, Forschungszentrum für Umweltpolitik, Deutschland  
Miranda.Schreurs@fu-berlin.de

S. D. Steuer

Freie Universität Berlin, Forschungszentrum für Umweltpolitik, Deutschland  
sibyl.steuwer@fu-berlin.de

## 8.1 Introduction

Autonomous driving (self-driving) vehicles, once just a science fiction dream, are a growing reality. Although not commercially available, rapid advancements in technology are creating a situation where technological development needs are moving beyond the regulatory environment. Technological developments have put pressure on governments to make regulatory changes permitting on-road testing of autonomous vehicles. Nevada became the first government worldwide to provide licenses for the testing and operation of autonomous vehicles in the state albeit under strict conditions. The Nevada Department of Motor Vehicles requires that “when autonomous vehicles are eventually made available for public use, motorists will be required to obtain a special driver license endorsement” [8]. Other states have followed Nevada’s lead. New regulations in the United States have provoked the question of whether regulatory changes are necessary in Europe as well. This chapter examines the emerging competition among automobile manufacturers related to the development and deployment of autonomous vehicles and their political and regulatory implications. Special attention is paid to the role of industrial stakeholders and political actors in relation to the development, uptake, and regulation of autonomous vehicle technologies. This is done from a comparative perspective considering developments in the United States, the European Union, the United Kingdom, Germany, Sweden, and Japan. The different framings of autonomous vehicle technologies and their potential contributions are also considered.

---

## 8.2 Autonomous driving from an innovation policy perspective

Increasing vehicle automation can be understood as an innovation process that may eventually lead to autonomous or semi-autonomous vehicles. Innovations can be classified according to the kind of innovation (e. g. product, process, organizational), the phases of innovation (invention, innovation, diffusion) or the magnitude of innovation (ranging from incremental to radical). A variety of influencing factors shape innovation processes. These include actors and actor networks, institutional frameworks, and technological developments both inside the innovation system and external to it. There may be co-evolutionary development of (technological) innovations and influencing factors [35]. Political intervention is one factor that can influence innovation processes and is our focus below.

Automated technologies have been incorporated into cars for decades, including anti-lock brakes, rear view alarm systems, lane departure warning systems, and adaptive cruise control. Information and communication technologies are likely to make possible the rapid deployment of some automated technologies (as is already the case with automated braking systems). Automated driving technologies could improve emergency response, enhance public transport systems, and optimize intermodal passenger transport.

Autonomous vehicle technology is now rapidly developing as autonomous driving vehicles are tested on the road. Various future development paths are possible as indicated

by the use cases described in the chapters by Wachenfeld (Ch. 2, see also Beiker in this book Ch. 14). Autonomous vehicle technology development paths range from incremental (e.g. automatic braking systems and transmission systems) to larger (automated crash avoidance safety systems and autonomous valet parking) to revolutionary changes to existing systems (fully autonomous vehicles in regular traffic) (for a definition and nomenclature see e.g. [25]). Depending on the state of a technology and the degree to which it has been implemented, there are different policy implications and regulatory intervention needs.

Different technological and use paths place different demands on the policy system. Incremental technological changes can usually be addressed with relatively minor changes to existing regulatory frameworks. More radical technological changes, such as the fully autonomous vehicle, will require deeper regulatory interventions as well as societal awareness raising and acceptance. The information and communication technologies (ICT) used in autonomous vehicles could also raise various questions related to data protection and storage although this will depend very much on the kind of technologies employed (Ch. 24).

Certainly one of the changes visible in relation to the emergence of autonomous vehicle technology is the emergence of new stakeholders. The technologies involved have widened the field of actors engaged in transport policies and led to the formation of new political coalitions. The ICT industries are important stakeholders in autonomous vehicle technologies and policies. Auto manufacturers and other players (like Google) are both in competition in the development of prototypes and in co-operation with each other in an effort to achieve a more favorable regulatory environment for the testing of autonomous vehicle technology.

The commercialization of autonomous vehicles is envisioned in the coming years by some manufacturers although there is considerable uncertainty as to when and if the technology will be made commercially available any time soon. Conditions for commercialization may also vary significantly country to country depending on road traffic conditions. While there are many questions as to whether commercialization is realistic in the near future, expert communities are urging regulators to prepare. In some jurisdictions (especially in the United States) early preparatory steps for potential deeper regulatory changes are being taken.

The speed and quality of advancements in autonomous driving technologies will impact demands for political intervention and steering. Many political interventions are driven by technological advancements. In the case of incremental technology development, there may be a parallel process of incremental regulatory changes, licensing decisions, or increase or decrease in financial or other political support schemes.

Incremental technological changes can be researched from the perspective of systems innovation theory, where innovations are understood as a result of multilateral interaction processes among firms, industries, organizations, and institutional frameworks [13], [14]. In the case of more revolutionary technological developments, which result in more disruptive changes to the status quo, politicians may be forced to make rapid and major regu-



latory decisions with little preparatory or learning time and with few existing experiences to draw upon.

In some cases, political actors may decide to try to accelerate the development of certain technologies and their large scale application. We have seen examples of policy-driven development with, for example, nuclear and renewable energies. In these cases, governments set incentives to support the development of these technologies, e. g. with research and development funding, support schemes, loans, the provision of infrastructure, and the taking over of liability risks even though in some countries, there were later decisions to phase out the use of a particular technology. There are also various examples in the transport sector, where state actors aimed at paving the way for certain technological choices. Apart from providing road infrastructure and thereby supporting individual automotive transport systems, e-mobility is a recent example of an attempt by policy-makers to help boost the implementation of a particular technology on a larger scale [9].

Policy makers do not typically like to intervene in the workings of market economies but at times may feel pressured to do so. As Edquist formulates it, “[t]here must be a ‘problem’ – which is not automatically solved by market forces and capitalist actors – for public intervention to be considered” [14].

Different factors may be behind a decision to support new technologies or technological applications. Policy makers may choose to promote a technology’s development in order to support the competitiveness of a domestic industry, in response to problem-pressures (e. g. safety or environmental factors), to experiment with new technological possibilities, or in reaction to international developments. As Edler and his colleagues put it: “Public innovation policy aims to strengthen the competitiveness of the economy or of selected sectors, in order to increase social welfare through knowledge creation and economic success” [12]. Numerous studies illustrate the importance of political intervention especially in the field of environmental policy innovation (see e. g. [30], [31], [32]).

There are several ways political actors can support the development and diffusion of new technologies. They may encourage and support the development of expert networks, finance research and development, create demand for a certain technology (e. g. by setting up support schemes or mandating government purchasing of a technology), and, by providing basic infrastructure (for a summary of approaches see [35]). Research support has been relevant in the development of autonomous vehicle technologies as well. States that are lagging behind in the technology are now scrambling to catch up. Since innovations go through various phases (see e. g. [26], [36]), governmental interventions may also be limited to particular innovation stages of a technology.

---

### **8.3 Visions of autonomous driving in Europe**

Visions of the future can both influence and reflect regulatory debates and their public perception. Visions for autonomous driving are being shaped by various stakeholders who have their own interests in advancing particular framings. When particular framings of a

technology take hold, they have the potential to direct future R&D trajectories and other societal and political actions. As we will see below, autonomous vehicle technologies are increasingly being viewed as an important component of future transport systems. Their development is being linked to concerns about industrial competitiveness, sustainable development, resource efficiency, safety, and assistance for the elderly and others who might otherwise not be able to drive a car. At the same time, there are some voices of concern that there could be a loss of control through robotization of automobiles. Here we consider how autonomous driving is discussed at the European level before turning further below to discussions in other economies.

To understand how autonomous driving vehicles are being discussed at the European level, we looked at strategy documents, European-funded research projects, and important networks related to autonomous driving. The analysis shows something of a mismatch between the interests of specific industrial actors in a rapid commercialization of autonomous driving technologies with broader European visions and objectives in the transport area in which autonomous driving technologies play some role, but little attention is given to autonomous vehicle technologies. Autonomous driving technologies are not widely discussed in European strategic documents although some research projects are being funded. This could be important since the extent of attention given to a subject and the visions associated with it may determine whether or not political support is lent to a technology's development. With little explicit attention given to autonomous driving vehicles at the European level, little political action can be expected unless there are either sudden technological innovation shocks or stronger political lobbying by stakeholders.

### 8.3.1 European Strategy Documents

Autonomous driving technologies have received little attention to date in European Commission strategic documents, including roadmaps, green papers, and white papers. To the extent autonomous vehicle technologies are discussed it is often in the context of broader EU debates on European competitiveness, innovation, climate protection, energy security, employment, and education (the EU 2020 strategy) [17].

Guided by the general framework objectives of the EU 2020 strategy, the following documents were analyzed: “Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a competitive and resource efficient transport system” [18], “Research and innovation for Europe’s future mobility. Developing a European transport-technology strategy” [19], the “CARS 2020: Action Plan for a competitive and sustainable automotive industry in Europe” [20], and the “Directive on Intelligent Transport Systems” [24]. These strategic documents cover issues linked to autonomous driving: mobility, infrastructure, digitalization, and general European discourses related to innovation and climate protection. The documents differ in their degree of specificity.

These documents shed light on which actors are taking up autonomous vehicle developments and give an impression of how far reaching the debate on autonomous driving

currently is in Europe. They also give a picture of how autonomous driving technology is being framed and which other societal, technological, and political issues it is being linked to. Finally – and maybe most importantly – these documents hint at the opportunities for and obstacles to the wider implementation of autonomous vehicle technologies at the European level.

### **8.3.1.1 Competitiveness and Innovation**

The European Union has as one of its goals the strengthening of the competitiveness of European industry and technological leadership including in important sectors like transport. The European Union’s transport roadmap stresses that “innovation is essential” to maintaining European competitiveness. Three areas of innovation that are stressed are: “efficiency through new engines, material, and design”, “cleaner energy use”, and “safer and more secure operations through information and communication systems” [18].

The communication document from the European Commission to the Parliament and the Council with the title “Research and innovation for Europe’s future mobility. Developing a European transport-technology strategy” [19] can be seen as the starting point for the development of a strategic transport-technology plan. At its visionary core is the expected change towards high value-added, innovative transport technologies. The transport industry of the future is expected to have to deal with highly complex mobility systems and to achieve this with a much lower carbon content. New materials, new production processes and new technology partners as well as “a stronger cross-fertilisation between the transport modes” are seen as crucial elements of this industry transition. The communication further stresses the expectation that the transport sector, the energy sector and information and communication technologies will be increasingly intertwined.

With regard to the automotive industry, strengthening competitiveness is central to European policy-makers. This is reflected by the CARS 2020 Action Plan, which was developed by DG ENTR (Directorate-general for Enterprise and Industry). The Competitive Automotive Regulatory System for the 21st century (CARS 21), the antecessor to CARS 2020, is concerned with overcoming the economic crisis in general and the crisis of the European automotive industry in particular. It sets a vision of: “An automotive industry that is leading in technology, in coordinated action with the fuel supplier industry, producing vehicles which are attractive to EU consumers, clean in terms of regulated pollutants, more fuel-efficient, safe, quiet and connected” [20].

### **8.3.1.2 Efficiency and sustainability**

At the European level, innovation is often linked to the development of an energy and resource-efficient and sustainable transport system. The transport roadmap spells out “A vision for a competitive and sustainable transport system”. The document highlights the dual goal of increasing transport and mobility within the Union while reducing greenhouse gas emissions by 60% until 2050. It further links EU 2020 and its flagship initiative on resource efficiency to transport policy. This translates into a transport system that must use “less and cleaner energy, better exploit a modern infrastructure and reduce its negative

impact on the environment and key natural assets like water, land and ecosystems” [18]. The document preparing the transport-technology strategy repeatedly stresses the EU’s vision to strengthen competitiveness by decarbonizing the transport system and accordingly calls for research in green technologies, material substitutions, and ICT in order to optimize intermodal and public transport and thereby enhance efficiency [19]. The CARS 2020 action plan also establishes a strong link between competitiveness and clean and green vehicles [20].

### 8.3.1.3 Harmonization and coordination

Realizing a single European market is at the heart of all European strategic documents related to transportation. This is a factor in the strong push for greater harmonization and coordination of national policies. The transport roadmap highlights the importance the EU Commission attaches to harmonization; here it is argued that “a situation where (for example) one Member State opted exclusively for electric cars and another only for biofuels would destroy the concept of free travel across Europe.” It also illustrates that the EU Commission aims at influencing technology development.

Also in the CARS 2020 action plan the fragmentation of vehicle regulation among EU Member States is considered problematic. The European Commission has called for more co-ordination and standardization [20]. In the CARS 21 process, Europe’s role in standardization has been highlighted. European Commission Vice-President Neelie Kroes “underlined the business opportunities created by making vehicles digital and connected, which requires public support for funding and standardization” [4]. CARS 2020 mentions the deployment of Intelligent Transport Systems (ITS) with reference to the automatic emergency call system, eCall as a particular organizational challenge, which demands strong coordination [20].

### 8.3.1.4 Safety

The “vision zero” which refers to the goal of eliminating traffic fatalities and injuries by 2050 is a key selling point for the industry. Safety is also addressed in the transport roadmap, although it receives considerably less attention compared to other issues, such as competitiveness, sustainability, resource-efficiency, or innovation.

The “vision zero” is mentioned as the ninth of ten goals of the transport roadmap. In line with this goal, the EU aims at halving road casualties by 2020. The EU is to be a world leader in safety and security of transport in all modes of transport [18]. Annex I spells out how to approach that goal and mentions – besides training and education – technological solutions such as “driver assistance systems, (smart) speed limiters, seat-belt reminders, eCall, cooperative systems and vehicle-infrastructure interfaces.” These can be seen as steps towards a general increase in automation and employment of information and communication technologies.

While the Directive on Intelligent Transport Systems puts comparatively high priority on an increase in safety through the application of information and communication technology, it does not explicitly speak of autonomous driving [24].

### 8.3.1.5 Summary

The document, “Research and innovation for Europe’s future mobility. Developing a European transport-technology strategy” [19] is where one might expect autonomous driving to be discussed as the communication addresses research, innovation, and mobility issues. Yet, while the term ‘smart’ occurs repeatedly in the text, neither ‘autonomous’ nor ‘driverless vehicles’ are mentioned. ‘Intelligent’ and ‘automated’ are mentioned only once in the context of transport infrastructure: “Modern infrastructure will increasingly incorporate new components which make it smart (intelligent, ICT-enabled and automated), green (new light and recyclable materials) and intermodal (automated terminals, hubs, and equipment). It will integrate the provision of alternative, low carbon fuels and innovative management and operation systems” [19].

Also with regard to research and innovation, autonomous driving is not discussed in the transport-technology strategy document although it could be argued that smart mobility is related to autonomous driving. Many of the visions described in the strategic document can be seen as being linked to autonomous vehicles, such as the interdependence between information and communication technologies and the transport system. Yet the main focus is on green technologies, material substitution and ICT and the optimization of intermodal transport.

Similarly, autonomous driving is not explicitly mentioned in the transport roadmap. Rather, intelligent transport systems, new communication services, and improved traffic management and information systems are seen as future opportunities to optimize traffic flow and reduce congestion and it is in this context that there are calls for further research and innovation. Links are made to multimodality and optimization of the use of infrastructure. Increased automation is not discussed centrally in relation to the modernization of the automotive industry in Europe. It is not even mentioned as an explicit topic in the CARS 2020 action plan.

The Directive on Intelligent Transport Systems, supported by DG Transport, targets steps to be taken towards the application of ITS and thus could be argued to touch upon aspects of autonomous driving, but does not explicitly mention the term or similar terms [24].

In summary, it can be said that while developments related to autonomous driving are mentioned in major strategic and vision documents, autonomous vehicles or autonomous driving are as such not firmly embraced by European bureaucrats or politicians.

## 8.3.2 Research related to autonomous driving (EU)

Somewhat more attention to autonomous vehicle technologies is being paid in European-funded research projects. There are various research projects funded by EU institutions that could impact autonomous driving. eCall is an initiative to bring rapid assistance to motorists involved in accidents. The Galileo project is a civilian global satellite-based navigation system. TAXISAT, is a related global navigation satellite system being developed for taxis. The SARTRE project, which is funded under the European Union’s Framework 7 program,

aims at advancing platooning (convoying to make more efficient use of road space). The project HAVE-it follows a long-term vision of autonomous driving and aims at high levels of automation. The purpose of the project is to “develop, validate and demonstrate important intermediate steps towards highly automated driving” such as advanced driver assistance systems. The research project, “SMART- New services enabled by the connected car”, focused on the implication, benefits, and services of connected cars. The project’s final report concluded that the connected car may make better use of infrastructure and will increase safety as well as fuel efficiency. The EU project “Citymobil – Advanced Transport for the Urban Environment” looked at automated public transport systems and some showcases (e.g. La Rochelle, Heathrow) with the aim of bringing the implementation of these public transport systems in cities one step further. An example of a joint public-private R&D initiative supported by various directorates-general (RTD – Research and Innovation, CNECT – Communications Networks, Content and Technology, ENER – Energy, ENV – Environment, ENTR – Enterprise and Industry) in the vehicle area is the European Green Cars Initiative launched in 2009 and with a priority on the development of efficient, safe, and environmentally friendly mobility, especially electro-mobility. Another important project is AdaptIVe, a successor to InteractIVe. Started in January 2014 and funded by the European Union’s Framework 7 Program, this consortium of 29 partners aims to demonstrate the potentials for automated driving in complex traffic environments while addressing some legal issues related to levels 1 to 4 of the SAE classification system.

Currently, the European Union is supporting research on autonomous driving within its framework research support scheme, “Horizon 2020”. There are several entry points for research on autonomous vehicles under the Horizon 2020 work program on leadership in enabling and industrial technologies in the section on Information and Communication Technologies [22]. Research for the transport sector is funded via the work program’s section 11 on smart, green and integrated transport. Here, autonomous driving is explicitly mentioned: “Automated and progressively autonomous driving applications in road transport, actively interacting with their intelligent environment could provide an answer to the EU objective of reconciling growing mobility needs with more efficient transport operations, lower environmental impacts and increased road safety” [21]. Apart from technical aspects including research on Advanced Driver Assistance Services, other aspects are supported such as behavioral aspects of driving (users’ responses to technology and on-board infrastructure, conditions of attention/loss of attention, etc.), ethical and gender issues as well as liability and standardization questions. The aim is to enhance the technology’s robustness and effectiveness in real-life situations.

In sum, research funded by the EU addresses various aspects of vehicle automation, the linking of information and communication systems to enhance efficiency, and research into autonomous vehicle technologies. There are growing signs of interest in the legal and societal implications of various automation levels and efforts to develop common definitions of vehicle automation levels. In the future, there will be need for more research on legal and societal questions tied to the greater use of automation in the transport sector.

### 8.3.3 Actors and arenas for autonomous driving in the EU

At the European level, different Directorates General (DG) are involved with questions addressing autonomous driving, with DG Connect being somewhat more engaged than for example, DG Mobility and Transport (MOVE) or DG for Enterprise and Industry (ENTR). In general, the EU Commission's interests in the transport area are more related to strengthening competitiveness throughout the whole Union including in remote areas (by e.g. supporting basic infrastructure development) and combatting climate change (i.e. e-mobility, urban development that supports public transport, bicycles, etc.) and not so much on implementing a vision of widespread use of autonomous driving vehicles.

DG Connect supports research in the field of automated mobility. It mainly addresses the research on intelligent transport systems (ITS) and highlights the role of ICT for ITS and mobility for it helps to reduce greenhouse gas emissions, increases energy efficiency in the transport sector, and enhances safety and mobility for people and goods in general. ICT is, however, mostly connected to the provision of real-time traffic information and not explicitly to autonomous road vehicles.

Information on autonomous driving is generally best assessed from DG Connect. While various aspects and projects are listed on their website, DG Connect forwards the reader to the iMobility Forum when looking for 'Automated Driving'. iMobility is one of the two main platforms on the European level that addresses vehicle automation. Via the iMobility Forum, the Commission is in contact with stakeholders. The platform is chaired by DG Connect and co-chaired by ERTICO-ITS Europe as well as the European Automobile Manufacturers Association (ACEA) and the European Association with tolled motorways, bridges and tunnels (ASECAP). Within iMobility, there is a working group on vehicle road automation. DG Connect partly finances this network. The iMobility Forum is linked to the ERTICO platform on intelligent transport systems in Europe. It was founded as a joint initiative by the European Commission, national transport ministries as well as industry representatives and aims to be a networking platform to spur exchange between actors and stakeholders related to all kinds of aspects of intelligent transport systems. It gives an overview of various research projects and activities in European Member States on ITS – and accordingly, automated vehicles [16].

In addition, the European Union provides a platform for debating visions of the future: FUTURIUM, part of the Digital Agenda of Europe. Several articles about autonomous driving can be found here.

To summarize, autonomous driving is not strategically anchored in European policy-making. The overarching discourses and objectives in the European transport sector can be subsumed under the headlines "competitiveness", "sustainability", "efficiency", "low-carbon" and, to a lesser degree, "safety". While autonomous driving can arguably contribute to any of these overarching objectives, stakeholders have not yet made much effort to make these links. The actors most actively addressing autonomous driving at the EU level deal with communication technologies, smart mobility, and intelligent transport systems (DG Connect including links to the EU's vision for the Digital Europe). The auto-

motive industry is mainly represented by its association. Individual companies do not appear very active on this issue at the EU-level. Autonomous driving is still in the realm of research rather than implementation and there exists no delineable vision for a future where autonomous vehicles play a major role. The cases addressed in this book do not play a role at the European level. In addition, there is a lack of integration of the topic into existing visions on transport and mobility. The needs for regulation and further research and development are being discussed in working groups both at the European and the German national levels, although autonomous driving is not high on the political agenda in either case. While the European Commission's administration is (co-) funding some of these initiatives, it has not taken a lead on the regulatory front; rather it is mostly active in supporting research and development. This is similar to the case in Germany. The issue of autonomous driving is on the radar screen of the German transport ministry and major associations but is only now slowly beginning to gain somewhat more attention. As is discussed further below, one relatively important new development is the reform of the United Nations Convention on Traffic Safety of 1968 that has been pushed by European automakers concerned about losing ground to international competitors. Next on their agenda is likely to be enabling legislation at the national level for testing purposes.

---

## **8.4 National and international legislative and political developments**

There are some differences in national discourses and support strategies for autonomous vehicles in major automobile producing markets and in the European Union. Below we consider developments in the United States, Japan, the European Union, the United Kingdom, Sweden and Germany. A common characteristic of these countries and the EU is that they lack national regulations for autonomous vehicles. It has been with state-level regulations in the United States and special permits in the case of European countries that test driving of self-driving cars has begun on the public roads [33].

### **8.4.1 Regulatory Changes to the United Nations Convention on Road Traffic (Vienna Convention)**

Reacting to developments in the United States, at the European level debates about the need for modifying the United Nations Convention on Road Traffic (the Vienna Convention) which had been on-going for about a decade, intensified. Article 8, paragraph 5, of the 1968 convention states: "Every driver shall at all times be able to control his vehicle or to guide his animals" [7]. Before Google pushed the debate forward, there was considerable disagreement among experts as to how much of an obstacle the Vienna Convention was. Google's release of its Self-Driving Car tipped the scale in the direction of regulatory change. As reported by Euractiv in the summer of 2013: "The EU is currently slightly



lagging behind the US. Autonomous driving is forging ahead in the US where steps are currently being taken to advance the technology by states adopting laws allowing for public road testing. However, Europe continues to lag behind the US with restrictive legislation that could, for the foreseeable future, effectively prevent the introduction of more advanced autonomous driving systems”. The report notes that “while the technology is ready, appropriate infrastructures and legal framework are still missing” [34]. In May 2014, the governments of Germany, Italy, France, Belgium, and Austria jointly proposed an amendment that was agreed to by the U.N. Working Party on Road Traffic Safety. The amendment would allow self-driving technologies as long as the system “can be overridden or switched off by the driver” [40]. If agreed upon by the parties to the convention, this could ease conditions for research and development of autonomous vehicles in many countries. For a more critical discussion see also section 8.4.6.

### **8.4.2 USA**

The United States is the most advanced nation in terms of introducing autonomous driving vehicles into its transport system. Legislation on autonomous driving has been passed in California, Michigan, Nevada, Florida, and the District of Columbia. In another six states – Arizona, Colorado, New Hampshire, Oklahoma, Oregon, Texas – the legislative attempts failed or are pending. There are another dozen states with ongoing regulatory initiatives. Some common features of their regulation regard the definitions of autonomous driving and autonomous vehicles employed and the conditions for obtaining operation and testing permission. Liability issues are also beginning to gain attention. California has set a 2015 deadline for the establishment of liability rules [51]. The newly enacted legislation in the United States has been developed with an eye towards allowing the testing of autonomous driving vehicles; most existing legislation is very restrictive regarding their use. At this stage neither the US government nor the automotive industries want to take large risks in relation to a technology that is still in an early development stage and that must still prove its reliability and safety. The same could be said for the other countries looked at here.

Regulatory initiatives in the United States were a direct response to Google’s push for legal clarification regarding the status of autonomous vehicles. Google, an active developer of self-driving software and technology, has lobbied state by state for the legislation enabling the operation of self-driving vehicles.

Various US politicians have strongly spoken up for the technology. Governors and other state politicians have on various occasions praised autonomous vehicles in public and claimed their leadership relative to other states by being frontrunners in passing supportive legislation.

Nevada Governor Brian Sandoval in early summer 2011 upon the passage of his state’s first law on autonomous driving vehicles stated: “Nevada is the first state in the country that is going to be (adopting) regulations for this vehicle (...) I think it is important for Nevada to be first on this. This is going to be part of the future and Nevada has always been

a very progressive state” [52]. In the Florida Senate, Republican Jeff Brandes sponsored an autonomous driving bill stating, “this legislation is about vision and leadership for the 21st Century world and forges a path for future innovative economic opportunities for Floridians” [42]. In September, when signing autonomous driving into law, California Governor Jerry Brown pointed out that he sees autonomous vehicles as “another example of how California’s technological leadership is turning today’s science fiction into tomorrow’s reality. (...) This law will allow California’s pioneering engineers to safely test and implement this amazing new technology” [2]. Noting that the state was slipping behind competitors, Michigan’s Governor Rick Snyder urged action. In his State of the State Speech in January 2013 the governor lamented: “They [California, Nevada and Florida] are ahead of us, and aren’t we the automotive capital of the world?” [5]. These examples give a clear impression of how politicians are starting to see autonomous vehicle technology and why they are promoting autonomous driving. For the leaders of these pioneering states, autonomous driving is seen as a sign of being on the technological cutting edge. The technology’s developers stress the safety benefits expected to come with the implementation of the technology, the increased comfort it will provide for elderly people, and the reduction in traffic congestion it should bring about.

Google has been an important entrepreneur that has stimulated both technological and regulatory developments. Google is a new and non-traditional player in transport, a sector which until now has been dominated by the automotive industry. With its retrofitting of automobiles with robotic software, the IT-company has challenged the automotive industry to innovate in new directions (Chapter 10). As noted above it has also put regulators under pressure to take action. Indeed, regulations have had to catch up with the technological innovations. Google’s actions have also pushed self-driving technologies onto the international agenda. It has opened up new research agendas and challenged policy makers and legal experts to consider the technological and social meanings of this rapidly developing new technology. In the European Union as well as internationally, it is also leading to discussions about the need for early harmonization of standards so as to prevent the institutionalization of incompatible standards in different world regions, e. g. via United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) regulations and vehicle type approvals that make sure that a vehicle’s design conforms to technical requirements. Beyond these issues, the role of ICT in the automotive industry of the future and very importantly, data protection concerns, will need societal debates and decisions.

In May 2013, the National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) established an official classification scheme for vehicles which range from level 0 where the driver is in complete control of the vehicle at all times to level 4 where the vehicle performs all safety-critical functions and monitors roadway conditions for the entire trip and could include unoccupied cars. The intermediary levels make increasing use of autonomous vehicle technologies. The NHTSA also issued recommendations to aid states as they make regulatory decisions regarding vehicles with new technological capacities [1]. There are other classification schemes that have developed as well. In particular the comprehensive SAE Standard J3016. It distinguishes between six categories with levels 0 (no automation),

1 (driver assistance) and 2 (partial automation) subsumed under the headline “human driver monitors the driving environment” and 3 (conditional automation), 4 (high automation) and 5 (full automation) labeled as “automated driving systems” (see also section 8.4.6 for the BASt classification scheme).

### **8.4.3 Japan**

Influenced by Google’s lobbying at the state level in the United States, Japan has begun to exhibit more interest in autonomous vehicles. Japan is renowned both for its robotic technologies and its low-carbon vehicle technologies. In 2013, Nissan received approval from the Japanese authorities to test its self-driving car, the Nissan Leaf. The Leaf is the first car that combines an electric motor with an advanced driver assistance system [3]. Kanagawa Governor Yuji Kuroiwa and Nissan Vice Chairman Toshiyuki Shiga tested the car on the Sagawa Expressway near Yokohama [38]. Prime Minister Shinzo Abe also has tested several “self-driving cars” produced by Japanese manufacturers Toyota, Honda, and Nissan and has claimed that he senses “that the Japanese technology is the world’s best” [39]. “In particular, in tough driving conditions such as tight curves and lane changing using autonomous driving, I think our Japanese technologies are among the world’s best” [37]. The competition to be a leader in the field is clearly heating up and politicians are lending their visibility and weight to support this emerging technology.

### **8.4.4 United Kingdom**

The situation of the United Kingdom is emblematic of the situation in many European states. There is growing concern that national automobile developers are being hampered by regulatory restrictions and lack of a clear political strategy for autonomous vehicles. A September 2013 advise of the British Houses of Parliament, Parliamentary Office of Science & Technology notes, “There is no explicit legislation which governs autonomous vehicles on UK roads”. The advice further laments: “At present there is no published strategy for the adoption of autonomous vehicles in the UK” [29]. As is the case with several other European member states, steps to improve the possibilities for testing are being taken. The British Ministry of Science and Universities has designated £6 million for research and technology into autonomous vehicle technologies and the Department for Transport is permitting trials on public roads.

### **8.4.5 Sweden**

Sweden is an early pioneer of self-driving technology. The Swedish Government signed a memorandum of understanding with Volvo to allow ordinary people to use self-driving

cars. The project involves the Swedish Transport Administration, Lindholmen Science Park and the City of Gothenburg. It is the first project that aims at testing autonomous vehicles on a larger scale with regular citizens. The project which started in 2014 aims at putting 100 autonomous vehicles onto a 50 km long road in Gothenburg by 2017/ 2018. It also sets the year 2020 as a timeline for when the first autonomous cars will be available for general usage [28].

The collaboration between the Swedish government and Volvo in this project suggests that in Sweden there is political recognition of the potential importance of this new technology. Swedish public officials highlight not only the safety dimensions of the new technology but also other sustainability factors. Ms. Catharina Elmsäter-Svärd, the infrastructure minister listed the many challenges to be tackled in the years to come that would be addressed by autonomous vehicles. These included environment, climate change, space, and traffic safety. In Europe, there appears to be a stronger linking of broad sustainability themes to driver-less cars than is the case in the United States [50].

Claes Tingvall from the Swedish Transport Administration explained why co-operation between the government and Volvo makes sense. Such co-operation can help address legislative questions regarding the new technology early on. At the same time, the societal benefits from the new technology can be incorporated into policy more generally: “We can make traffic as a whole safer, smoother, less polluting, but also try to build infrastructure in a quite different way”. Minister Elmsäter-Svärd noted: “This project is very unique and the expectation from the Swedish government is still to be in the lead when it comes to road safety. We know that livability, environment issues and also road safety is so close together in the project.” Noteworthy, is that the inscription on the Volvo self-driving car states: “Drive Me. Self-driving cars for sustainable mobility” [50].

### 8.4.6 Germany

In Germany, autonomous driving vehicles are in the testing phase. For public demonstration purposes, the former Minister for Research and Development, Annette Schavan tested the autonomous driving vehicle, “MadeInGermany”, developed at Freie Universität Berlin. AutoNOMOS – Autonomie- und Fahrerassistenzsysteme für Pkw und Lkw” – was supported with 2.2 Million euros by the Research Ministry. In an interview, Minister Schavan mentioned the necessity for further innovation of the technology as it could enhance the mobility of elderly and handicapped people [41]. Apart from AutoNOMOS, various other research projects in Germany have helped to advance an increase in automation towards autonomous driving, including the Technical University of Braunschweig’s Stadtpilot and TU Darmstadt’s Conduct-by-Wire projects [46], [47].

The research ministry, which is interested in supporting innovative technologies and advancing technological niches, has set incentives to promote research on autonomous driving. The ministry’s high-tech mobility strategy stresses links among energy policy, e-mobility and intelligent logistics. It further stresses the role of ICT applications in the

automotive industry, although it does not focus explicitly on autonomous driving [11]. Not only has the research ministry funded research on autonomous driving, there are currently more projects underway funded by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, one of which is the project aFAS. It is set up to develop a driverless vehicle to protect construction sites on highways [45].

The Federal Highway Research Institute has – similarly to the NHTSA – elaborated a nomenclature to facilitate the legal assessment of different degrees of automation. The nomenclature distinguishes “driver only” and “assisted” systems from systems with “partial automation” (the system takes over lateral and longitudinal control in certain situations), “high automation” (the driver does not need to continuously monitor the system) and “full automation” (the system fully takes over lateral and longitudinal control) [25]. This categorization is widely accepted by German experts, bureaucrats, and political stakeholders.

The German automotive industry has begun pushing for change. Partnering with Nokia, Mercedes-Benz responded to the Google challenge in August 2013 with the S 500 Intelligent Drive Autonomous Car long-distance test drive. Following the path Bertha Benz travelled in her historic 1888 long-distance road trip, the S 500 Intelligent Drive vehicle successfully drove on its own between Mannheim and Pforzheim (with a driver behind the wheel as a back-up). Audi, BMW, and auto-suppliers Bosch and Continental Automotive Systems are working on autonomous and semi-autonomous vehicle technologies as well [40].

The German government has not, however, responded with new regulatory initiatives or an explicit strategy to push the implementation of autonomous driving. Rather, governmental actors are focused on other technology options that rather conform to European discourses of sustainable mobility. These are linked to the broader over-arching policy towards a low-carbon energy transformation. E-mobility, for example, is not only backed by a strategic governmental document but is also repeatedly affirmed in speeches by high-level politicians, including the chancellor [9], [10].

The VDA is one of the technology’s strongest proponents lobbying for regulatory change. It is one of the few actors that has expressed a clear vision for autonomous driving in its publications. The VDA has organized conferences centered on vehicle automation, the connected car and autonomous driving. The VDA envisions autonomous driving to be a widespread reality in the future. The association has illustrated concrete steps to be taken on the way towards a self-driving future, such as Lane Changing Support, improved human-machine-interface, and longitudinal guiding assistance [48]. In addition, supply companies have an interest in pushing a higher degree of automation in vehicles and, consequently, autonomous driving [6].

The main national arena addressing autonomous driving is a round table initiated and run by the Transport Ministry. On the working level, the participants are trying to institutionalize a stakeholder dialogue as a first step in getting the issue more strongly on the German policy agenda. The approximately 45 round table members meet twice a year. They consist of representatives of the German Association of Automotive Industry (Verband der

Automobilindustrie, VDA), representatives of automotive manufacturers, the Ministry of Transport, the Federal Highway Research Institute (BASt), the Federal Motor Transport Agency (KBA), the Ministry of Justice, the Ministry of Economy and Energy, representatives of science and research (e.g. Fraunhofer Institute, German Aerospace Center (DLR), Universities) and associations (such as the Association of International Motor Vehicle Manufacturers (Verband der internationalen Kraftfahrzeughersteller, VDIK), the German Insurance Association (Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft, GDV), the German Automobile Club (Allgemeiner Deutscher Automobilclub, ADAC), and the Association of the Technical Control Boards (Verband der TÜVs)). Three working groups have been established and meet four times a year. The working groups are concerned with legal questions, issues tied to drivers and vehicles including type approval, and research.

The focus on type approval – the procedure whereby an EU Member State certifies that a type of vehicle, system, component or separate technical unit satisfies the relevant administrative provisions and technical requirements [23] – in the second working group on driver and vehicle shows that the round table aims at dealing with many issues at a technical and rather low regulatory level (compared to more general legal questions that would require changes in regulatory law or in the road traffic act). Many aspects of automation do not touch upon regulated aspects and would be generally allowed since they are not defined under the UNECE system. Higher level legal aspects would be in the realm of the Ministry of Justice but are currently not dealt with.

The topics discussed at the round table address highly automatized vehicles but tend not to address fully automated driving technologies. The round table talks are to some degree strategic in that they aim at putting or keeping the topic on the policy agenda. It is not so much about visions but about attempts to show progress in practice. However, the whole process is neither very transparent, nor very visible – meeting discussions are not documented for the general public and societal stakeholders are not widely included. There is also little exchange with European platforms on autonomous driving.

Different views regarding the importance of amending the Vienna Convention were expressed in Germany. The amendment was welcomed by Thomas Weber, head of group research at Daimler and head of development at Mercedes-Benz who was quoted as saying: “Today I am only allowed to take my hands off the wheel to a limited extent. Thankfully the Vienna Convention on Road Traffic has been changed” [40]. Other German experts did not see the convention as so much of a hindrance in relation at least in regard to highly, but not fully-automated vehicles. By definition, in highly automated vehicles, a driver would always be expected to be present and able to take over control and monitor traffic as expected by current legislation. These experts considered amendments to public regulatory law, which have not yet occurred, to be more important [25], [43]. In a personal interview, Dr. Christoph Hecht from the German Automotive Club, ADAC, representing the consumer perspective explained that a customer has no incentive to buy a highly automated vehicle unless they are allowed to make use of it.

## 8.5 Analysis

Autonomous driving is only slowly emerging as a concept known to all but a small community of experts. It is not deeply anchored in European mobility discourses, strategies, or outlooks. Yet there is some linking of autonomous driving technologies to other strategic concerns, including competitiveness of the automotive industry, sustainable mobility, safety, and the elderly. The framing of autonomous driving varies by national context, reflecting the dominant concerns of different regions. In the United States, where there are over 30,000 traffic deaths each year, safety issues are brought to the fore. In Japan, which has been faced by a long economic slump, competitiveness is a top priority. In Sweden, autonomous driving is being linked to sustainable mobility. In Germany, it is high-end automobiles that are being fitted with autonomous driving technology, suggesting the importance of being at the technological cutting edge in the luxury automobile market. As autonomous vehicle technologies advance, debates in Europe and abroad may shift, but for the time being it appears that the commercialization and wide-spread use of fully automated driving vehicles remains a distant vision.

Innovations in autonomous driving technologies are being presented as important for technological leadership in the automobile sector across all of the jurisdictions examined here even if autonomous vehicles are not yet seen as commercially viable.

In the United States, regulatory competition is emerging among states eager to be seen as frontrunners in systems that could make traffic safer and traffic flows smoother. State-level actors are boasting their regulatory initiatives to show their state's technological leadership. Leadership in realizing "science fiction" visions may be important for long-term competitiveness. This could either be seen as a kind of "Delaware effect", with states competing to attract industries to their region with the provision of favorable regulatory environments, or conversely, a "California effect," where states compete with each other by establishing the more advanced regulatory standards to promote technological innovation and competitive advantage within their own states [49].

In Japan, politicians are sending the message to consumers (both domestic and overseas) that autonomous driving technologies can be linked to Japanese technological strengths in robotics, electro-mobility and energy efficiency, to produce next generation automobiles. The Swedish government is among the most ambitious in its aim to commercialize autonomous driving vehicles by 2020 and set "sustainable mobility" into motion.

The German government has done little to initiate broader discussions about autonomous driving. While the Transport Ministry has organized a stakeholder platform at the national level, it has not tried to stimulate wider public debates at the German national level or as part of official consultations at the European level. The main push for greater discussion and strategizing has come from stakeholders. Volvo, for example, has been quite active at the EU level as has the German automobile association (VDA). Also component suppliers such as Continental and ICT companies have lobbied for more support.

Although by no means definitive, the research conducted here suggests some other interesting patterns that deserve further attention as well as some soft and preliminary conclusions.

First, the kind of regulatory competition seen in the United States, may be spreading to the international level as countries vie with each other for technological leadership in a newly emerging field. Autonomous driving is not only about the automotive industry but about many other industrial branches that will profit from a higher degree of automation such as component suppliers. This is why there is a growing interest in promoting location-al advantages and why political commitments are starting to be made in some countries to support certain development paths.

Second, smaller automobile companies (e. g. Volvo, Nissan) and non-traditional players (e.g. Google) moved earlier with autonomous vehicle technologies to gain public and political attention compared with the bigger, more established automotive manufacturers (including German manufacturers). One might read into this that given that autonomous driving technologies are still at early stages of development, larger companies have been wary about taking reputational risks with still unproven technologies. Smaller companies may be more willing to take such risks since they are dependent on leadership advantage. Geels argues that incumbent firms' interest in radical and transformative change is generally not very high since incumbents have typically sunk investments in existing technologies, skills, and people. He further points to the characteristics of more radical changes being riskier and leading to changes that may not match existing competencies [27].

Third, autonomous vehicles are portrayed as highly innovative and demonstrative of a nation's technological (and economical) leadership capabilities by stakeholders, yet political leaders have not played much of a role in trying to promote autonomous vehicle technology in public. Fully automated vehicle technology is in an early development stage. How it fits into dominant strategic visions for mobility or how realistic commercialization of the technology is, is still not clear which may explain why only limited political actions have been taken.

Fourth, the Zero-Accident-Vision has been an important message for developers of autonomous vehicles and component suppliers. The vision appears to play a larger role in the United States where there are higher fatality rates than is the case in Europe or Japan although in all countries considered, greater use of remote sensing and other technologies is seen as a means of improving traffic safety.

Fifth, links to efficiency and environmental protection are found in all countries, but are especially strong in Japan and Europe. And within Europe, Sweden is pursuing this image quite aggressively.

Sixth, there are many unsolved questions with regard to accountability, data protection, the legal framework as well as social and ethical considerations. These issues are only slowly beginning to be debated. The possible impacts of autonomous driving on mobility behaviours and human-machine interactions as well as data protection and acceptance aspects will need to be studied and addressed. Indeed, nowhere has there been much political attention paid to the societal implications of greater use of autonomous vehicle



technologies even though there are many non-technical aspects that must be considered (Ch. 29). These include the development of appropriate regulations covering technological, safety, and liability standards as well as rules of the road for autonomous vehicles. There remain also many unanswered questions with regard to public regulatory law, licensing law and liability law in the countries considered (Ch. 25).

Seventh, perhaps reflective of the fact that autonomous vehicles are still only in early pilot testing phases, few efforts have been made to develop future mobility scenarios in which autonomous driven vehicles play a central role (Ch. 11). In Europe, the driverless-car vision has not been embedded in an overall strategy for realizing sustainable mobility.

Finally, where the most governmental activity can be seen is in providing support for research and development of autonomous vehicle technologies. States that are lagging behind technologically are scrambling to catch up by supporting more research and development. There are still critical technical issues that need further developing before a wide-scale application of autonomous driving can be considered and this provides opportunities for new entrants. There are also uncertainties regarding which technologies may win out in the long run.

---

## 8.6 Conclusion

Since there are already numerous technological solutions being implemented that are linked to various societal goals (e. g. e-mobility, intermodal solutions, strengthening public transport), autonomous driving will have to be debated in the context of these (competing or complementary) technological paths. Discussions about future mobility possibilities and the role that could be played by autonomous or partially or highly automated vehicles should be more inclusive. It should not be restricted to an arena primarily concerned with technical and legal questions such as the round table in Germany. Other stakeholders such as non-governmental organizations or think tanks could be integrated into existing structures (stakeholder platforms, legal processes, etc.), but new arenas could also be created. In parallel, advisory bodies could be set up to assess not only technological advancements and needs, but also social, environmental, and regulatory implications of greater use of autonomous driving technologies.

---

## References

1. Aldana, K.: U.S. Department of Transportation Releases Policy on Automated Vehicle Development. <http://www.nhtsa.gov/About+NHTSA/Press+Releases/U.S.+Department+of+Transportation+Releases+Policy+on+Automated+Vehicle+Development>. Accessed 21 July 2014
2. Brown, E.G.: Governor Brown Signs Bill to Create Safety Standards for Self-Driving Cars. <http://gov.ca.gov/news.php?id=17752>. Accessed 10 July 2014
3. Beissmann, T.: Nissan Leaf becomes Japan's first road-legal autonomous vehicle. <http://www.caradvice.com.au/253761/nissan-leaf-becomes-japans-first-road-legal-autonomous-vehicle/>. Accessed 10 July 2014

4. CARS 21 High Level Group on the Competitiveness and Sustainable Growth of the Automotive Industry in the European Union: Final Report 2012, 6 June 2012
5. Clark, M.: States take the wheel on driverless cars. <http://www.usatoday.com/story/news/nation/2013/07/29/states-driverless-cars/2595613/>. Accessed 10 July 2014
6. Continental: Automated Driving: Adapting the Legal Framework in Line with Market Dynamics. [http://www.continental-corporation.com/www/pressportal\\_com\\_en/themes/press\\_releases/1\\_topics/automated\\_driving\\_en/pr\\_2014\\_07\\_07\\_zulieferer\\_innovativ\\_en.html](http://www.continental-corporation.com/www/pressportal_com_en/themes/press_releases/1_topics/automated_driving_en/pr_2014_07_07_zulieferer_innovativ_en.html). Accessed 10 July 2014
7. Convention on Road Traffic. [http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/conventn/Conv\\_road\\_traffic\\_EN.pdf](http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/conventn/Conv_road_traffic_EN.pdf). Accessed 21 July 2014
8. Department of Motor Vehicles: Autonomous Vehicles. <http://www.dmvnv.com/autonomous.htm>. Accessed 21 July 2014
9. Die Bundesregierung: Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung, August 2009. [http://www.bmbf.de/pubRD/nationaler\\_entwicklungsplan\\_elektromobilitaet.pdf](http://www.bmbf.de/pubRD/nationaler_entwicklungsplan_elektromobilitaet.pdf). Accessed 10 July 2014
10. Die Bundesregierung: Rede von Bundeskanzlerin Merkel bei der Internationalen Konferenz „Elektromobilität bewegt weltweit“, Berlin, 27. Mai 2013. <http://www.bundesregierung.de/Content/Archiv/DE/Archiv17/Reden/2013/05/2013-05-27-merkel-elektromobilitaet.html;jsessionid=AE3DA68C72591889A70E1C05B8F4C0D2.s2t2?nn=437032>. Accessed 10 July 2014
11. Die Bundesregierung: Fahrzeug und Verkehrstechnologien. <http://www.hightech-strategie.de/de/325.php>. Accessed 10 July 2014
12. Edler, J. Kuhlmann, S. Smits, R.: New Governance for Innovation. The Need for Horizontal and Systemic Policy-Coordination, Report on a Workshop held at the occasion of the 30th anniversary of the Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research (ISI), Karlsruhe, November 2002. Fraunhofer ISI Discussion Papers Innovation System and Policy Analysis, No. 2 (2003)
13. Edquist, C.: Systems of Innovation Approaches – Their Emergence and Characteristics. In: Edquist, C. (ed.) Systems of Innovation: Technologies, Institutions and Organisations, pp. 1–35. Pinter Publishers/Cassell Academic, London (1997)
14. Edquist, C. Innovation Policy – A Systemic Approach. In: Archibugi, D., Lundvall, B.Å. (eds.) The Globalizing Learning Economy. Oxford Scholarship Online (2003) DOI:10.1093/0199258171.003.0013
15. Edquist, C., Hommen, L., Johnson, B., Lemola, T., Malerba, F., Smith, K.: The ISE Policy Statement: The Innovation Policy Implications of the ‘Innovation Systems and European Integration’ (ISE) Research Project, University Unityryck, Linköping (1998)
16. Ertico ITS Europe: Towards Futurama – Developments in Road Transport Automation. <http://www.ertico.com/towards-futurama-developments-in-road-transport-automation/>. Accessed 10 July 2014
17. European Commission: Communication from the Commission. Europe 2020. A strategy for smart, sustainable and inclusive growth. COM(2010) 2020 final
18. European Commission: White Paper. Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a competitive and resource efficient transport system. COM (2011) 144 final
19. European Commission: Communication from the Commission to the Council and the European Parliament. Research and innovation for Europe’s future mobility. Developing a European transport-technology strategy. COM (2012) 501 final
20. European Commission: Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. CARS 2020: Action Plan for a competitive and sustainable automotive industry in Europe. COM (2012) 636 final

21. European Commission: Horizon 2020 Work Programme 2014–2015. 11. Smart, green and integrated transport. European Commission Decision C (2013)8631 of 10 December 2013
22. European Commission: Horizon 2020 Work Programme 2014–2015. 5. Leadership in enabling and industrial technologies. European Commission Decision C (2014)2690 of 29 April 2014
23. European Parliament and the Council of the European Union: Directive 2007/46/EC of 5 September 2007 establishing a framework for the approval of motor vehicles and their trailers, and of systems, components and separate technical units intended for such vehicles
24. European Parliament and the Council of the European Union: Directive 2010/40/EU of 7 July 2010 on the framework for the deployment of Intelligent Transport Systems in the field of road transport and for interfaces with other modes of transport
25. Federal Highway Research Institute: Legal consequences of an increase in vehicle automation. Consolidated final report of the project group, Part 1., Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch-Gladbach [http://www.bast.de/DE/FB-F/Publikationen/Download-Publikationen/Downloads/F-legal%20consequences.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bast.de/DE/FB-F/Publikationen/Download-Publikationen/Downloads/F-legal%20consequences.pdf?__blob=publicationFile). Accessed 10 July 2014
26. Geels, F. W.: From Sectoral Systems of Innovation to Socio-Technical Systems. Insights About Dynamics and Change from Sociology and Institutional Theory. *Research Policy*, 33, 897–920. (2004)
27. Geels, F.: Reconceptualising the co-evolution of firms-in-industries and their environments: Developing an inter-disciplinary Triple Embeddedness Framework. *Research Policy* 43, 261–277 (2014)
28. Grünweg, T.: Pilotprojekt “Drive Me”: Geisterfahrt in Göteborg. <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/autonomes-fahren-pilotprojekt-drive-me-von-volvo-in-goeteborg-a-972134.html>. Accessed 10 July 2014
29. Houses of Parliament, Parliamentary Office of Science & Technology: Autonomous Road Vehicles. PostNote, No. 443 (2013)
30. Jänicke, M. and Lindemann, S.: Governing Environmental Innovations: a new role for the nation state. *Global Environmental Politics*. 4(1), 29–47 (2010)
31. Jacob, K., Beise, M., Blazeczak, J., Edler, D., Haum, R., Jänicke, M., Löw, T., Petschow, U., Rennings, K.: Lead Markets for Environmental Innovations. Heidelberg: Physica. *ZEW Economic Studies* 27 (2005)
32. Jacob, K., Jänicke, M.: Lead Markets for Environmental Innovations. A New Role for the Nation State. *Global Environmental Politics*. 4 (1), 29–46 (2004)
33. Kim, M.K., Heledii, Y., Asheriji, I. Thompsoniy, M.: Comparative analysis of laws on autonomous vehicles in the U.S. and Europe. [http://www.auvsishow.org/auvsi2014/Custom/Handout/Speaker8657\\_Session789\\_1.pdf](http://www.auvsishow.org/auvsi2014/Custom/Handout/Speaker8657_Session789_1.pdf). Accessed 21 July 2014
34. Martini, C.: Seminar explored policy and legal implications surrounding the adoption of autonomous driving in Europe. Press release. <http://pr.euractiv.com/pr/adoption-autonomous-driving-europe-debate-starts-eu-level-97552>. Accessed 21 July 2014
35. Miethling, B.: Politische Triebkräfte der Innovation. Peter Lang, Frankfurt am Main (2012)
36. Negro S.O.: Dynamics of Technological Innovation Systems. The Case of Biomass Energy. Labor Grafimedia, Utrecht (2007)
37. Nissan: Japan Prime Minister Abe Goes Public with Autonomous Drive Car. <http://reports.nissan-global.com/EN/?p=13496>. Accessed 10 July 2014
38. Prigg, M.: Nissan’s ‘Tron’ self-driving car becomes first to be allowed on Japanese highways. <http://www.stuff.tv/google/nissan-dumps-driver-self-driving-cars-becomes-first-be-allowed-japanese-roads/news>. Accessed 21 July 2014
39. Quigley, J.T.: Japanese Prime Minister “Test Drives” Autonomous Vehicles. <http://thediplomat.com/2013/11/japanese-prime-minister-test-drives-autonomous-vehicles/>. Accessed 10 July 2014

40. Reuters: Cars could drive themselves sooner than expected after European push. <http://www.reuters.com/article/2014/05/19/us-daimler-autonomous-driving-idUSKBN0DZ0UV20140519>. Accessed 21 July 2014
41. Rothmund, S.: Ministerin testet selbststeuerndes Fahrzeug. [http://www.fu-berlin.de/campusleben/newsletter/1209/1209\\_schavan.html](http://www.fu-berlin.de/campusleben/newsletter/1209/1209_schavan.html). Accessed 10 July 2014
42. Schorsch, P.: Rep. Jeff Brandes' 'Google Car' Legislation Drives Forward. <http://stpete.patch.com/groups/peter-schorsch-blogs/p/bp--rep-jeff-brandes-google-car-legislation-drives-forward>. Accessed 10 July 2014
43. Smith, B.W.: Automated Vehicles are Probably Legal in the United States. The Center for Internet and Society, CIS, Stanford (2012)
44. Smith, B.W.: SAE Levels of Driving Automation. <http://cyberlaw.stanford.edu/blog/2013/12/sae-levels-driving-automation>. Accessed 10 October 2014
45. Stolte, T., Bagschik, G., Reschka, A. and Maurer, M.: Automatisch fahrerlos fahrendes Absicherungsfahrzeug für Arbeitsstellen auf Autobahnen (aFAS) Konferenzbeitrag beim 16. Braunschweiger Symposium AAET 2015 am 12./13. Februar 2015. [http://www.its-nds.de/media/veranstaltungen/aaet/AAET\\_2015\\_Programm\\_Screen\\_Ausfuellbar2.pdf](http://www.its-nds.de/media/veranstaltungen/aaet/AAET_2015_Programm_Screen_Ausfuellbar2.pdf). Accessed 10 March 2015
46. Technical University Braunschweig: Das Projekt Stadtpilot. <https://www.tu-braunschweig.de/stadtpilot>. Accessed 10 March 2015
47. Technical University Darmstadt: Mit dem Fahrzeug gemeinsam fahren – Conduct-by-Wire 2. [http://www.iad.tu-darmstadt.de/forschung\\_15/forschungsschwerpunkte\\_1/fahrzeugergo\\_1/conductbywire\\_6.de.jsp](http://www.iad.tu-darmstadt.de/forschung_15/forschungsschwerpunkte_1/fahrzeugergo_1/conductbywire_6.de.jsp). Accessed 10 March 2015
48. VDA: Vernetzung. Die digitale Revolution im Automobil. [http://www.vernetzung-vda.de/upload/vda05/downloads/magazin/VDA\\_Magazin\\_Vernetzung.pdf](http://www.vernetzung-vda.de/upload/vda05/downloads/magazin/VDA_Magazin_Vernetzung.pdf). Accessed 10 July 2014
49. Vogel, D.: Trading Up: Consumer and Environmental Regulation in a Global Economy. Harvard University Press, Cambridge (1995)
50. Volvo Car Germany 2013 <https://www.media.volvocars.com/de/de-de/media/videos/136535/drive-me-selbstfahrende-autos-fr-eine-nachhaltige-mobilitt-newsfeed>. Accessed 10 July 2014
51. Weiner, G. and Smith, B.W.: Automated Driving: Legislative and Regulatory Action. [cyberlaw.stanford.edu/wiki/index.php/Automated\\_Driving:\\_Legislative\\_and\\_Regulatory\\_Action](http://cyberlaw.stanford.edu/wiki/index.php/Automated_Driving:_Legislative_and_Regulatory_Action). Accessed 17 June 2014
52. Whaley, S.: Gov. Sandoval 'Taken For Ride' In Google Self-Driving Car. <http://www.nevadanews-bureau.com/2011/07/20/gov-sandoval-%E2%80%99taken-for-ride%E2%80%99-in-google-self-driving-car/>. Accessed 10 July 2014

Barbara Lenz, Eva Fraedrich

## Inhaltsverzeichnis

<b>9.1 Einleitung</b> .....	176
<b>9.2 Carsharing: „Kernapplikation“ neuer Mobilitätskonzepte</b> .....	177
9.2.1 Stationsbasiertes Carsharing .....	178
9.2.2 Flexibles (One Way) Carsharing .....	179
9.2.3 Peer-to-Peer Carsharing .....	180
<b>9.3 Nutzer und Nutzung der neuen Mobilitätskonzepte</b> .....	180
9.3.1 Nutzer und Nutzungsvoraussetzungen .....	181
9.3.2 Der Carsharer – der „neue Mensch“ in einer Sharing Economy? .....	181
<b>9.4 Digitalisierung der Alltagswelt als Grundvoraussetzung für neue Mobilitätskonzepte</b> .....	183
<b>9.5 Weiterentwicklung der neuen Mobilitätskonzepte durch Automatisierung des Carsharing?</b> .....	184
9.5.1 Autonomes Valet-Parken im Carsharing .....	185
9.5.2 Carsharing unter Einsatz von „Vollautomaten mit Verfügbarkeitsfahrer“ .....	186
9.5.3 Das Carsharing-Fahrzeug als Vehicle-on-Demand .....	187
9.5.4 Zwischenfazit .....	188

---

B. Lenz (✉)

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Verkehrsforschung, Deutschland  
Barbara.Lenz@dlr.de

E. Fraedrich

Humboldt-Universität zu Berlin, Geographisches Institut, Deutschland  
eva.fraedrich@geo.hu-berlin.de

<b>9.6 Neue Mobilitätskonzepte jenseits von Carsharing:</b>	
<b>Hybridisierung des öffentlichen Verkehrs?</b> . . . . .	189
9.6.1 Neugestaltung von Intermodalität und Flexibilisierung des öffentlichen Verkehrs .	190
9.6.2 Individualisierung des öffentlichen Verkehrs . . . . .	191
9.6.3 Verdichtung der Bedienungsmöglichkeiten mit öffentlichem Verkehr . . . . .	192
<b>9.7 Implementierung von neuen Mobilitätskonzepten mit autonomen Fahrzeugen . . . .</b>	192
<b>9.8 Fazit . . . . .</b>	193
<b>Literatur . . . . .</b>	194

---

## 9.1 Einleitung

Verkehr ist Ausdruck der Befriedigung von Mobilitätsbedürfnissen mit unterschiedlichen Verkehrsmitteln – im Alltagsverkehr sind Menschen zu Fuß, mit dem Fahrrad, den Verkehrsmitteln des öffentlichen Verkehrs oder dem Pkw unterwegs. Dabei werden zwei große Gruppen unterschieden: Personen mit einer ausgeprägten Präferenz für die Nutzung des privaten Pkw einerseits und Personen mit einer Vorliebe für den sogenannten „Umweltverbund“, d. h. für die Kombination aus öffentlichem Personenverkehr (ÖPV), Fahrrad- und Fußwegen, andererseits [1]. Zusätzlich bildet sich seit einigen Jahren die Gruppe der „Multimodalen“ heraus, die nicht mehr auf ein spezifisches Verkehrsmittel oder einen bestimmten Verkehrsmittelmix ausgerichtet sind, sondern in ihrem persönlichen Repertoire der Verkehrsmittelnutzung eine große Bandbreite aufweisen [1, 2]. Dieser allmähliche Verhaltenswandel fällt mit der Entwicklung neuer Mobilitätskonzepte zusammen, die zum einen Weiterentwicklungen des klassischen Carsharing darstellen [3], zum anderen etablierte Mitfahrgelegenheiten um neue Formen ergänzen. Zu den bereits realisierten neuartigen Konzepten gehören flexible Carsharing-Flotten wie die von Car2Go, DriveNow oder Multicity, die als Mobilitätsdienstleistungen in Großstädten in Deutschland, aber auch in zahlreichen Städten Europas und der USA zur Verfügung stehen. Parallel dazu entwickeln sich sogenannte Peer-to-Peer-Angebote, in denen private Fahrzeugbesitzer über eine Internet-Plattform ihr Fahrzeug für eine Mitglieder-Community bereitstellen. Auf Internetplattformen wie Mitfahrzentrale oder Zimride bieten Privatpersonen Mitfahrgelegenheiten auf Strecken und zu Zeiten an, auf bzw. zu denen sie selbst ohnehin unterwegs sind. Zusätzlich etablieren sich derzeit auch mehr und mehr Angebote, wie z. B. Uber oder Lyft, bei denen die Unterscheidung zwischen (semi-)professioneller Personenbeförderung, vergleichbar mit einer Taxidienstleistung, und „klassischer“ Mitfahrgelegenheit nicht immer einfach ist. Die neuen Formen von Carsharing und Mitfahrdiensten entstehen vor allem in den großen Städten und Metropolregionen der Industrieländer.

Das Neue und gleichzeitig auch das Besondere an solchen neuen Mobilitätskonzepten besteht in dem hohen Maß an Flexibilität, das diese Konzepte den Nutzern bieten. Fahrzeuge des flexiblen Carsharing sind ohne Vorplanung zu einem beliebigen Zeitpunkt und

für eine beliebige Dauer verfügbar. Ähnlich flexibel sind die neuen Mitfahrdienste, sie gleichen dabei allerdings dem konventionellen Taxi. Eine wesentliche Voraussetzung für die Entstehung aller neuen Mobilitätskonzepte sind die Möglichkeiten, die heute hinsichtlich der Vernetzung von Fahrzeugen, Nutzern und Betreibern mithilfe von Informations- und Kommunikationstechnologien vorhanden sind. Dadurch wird ein grundsätzlich einfacher und schneller Zugriff auf Fahrzeuge oder Dienste mittels Internet oder Smartphone-App überhaupt erst möglich. Dennoch bleibt grundsätzlich der Zugang im Sinne der physischen Distanz zwischen dem Standort des Nutzers und dem des Fahrzeugs als Nutzungshürde bestehen, insbesondere in Gebieten, in denen die Fahrzeugdichte nicht sehr hoch ist.

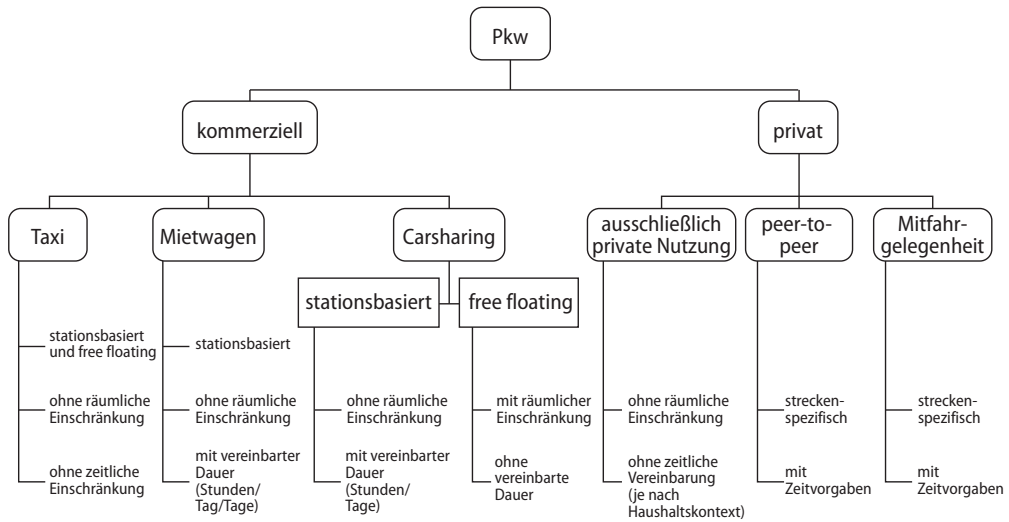
Mit der Einführung von autonomen Fahrzeugen erscheint es möglich, die bestehenden Konzepte deutlich zu erweitern und auszudifferenzieren: Der Zugriff auf und Zugang zum Fahrzeug verändern sich, indem nicht mehr der Nutzer zum Fahrzeug, sondern das Fahrzeug zum Nutzer kommt; die Fahrzeuge selbst werden für einen erweiterten Personenkreis wie z. B. mobilitätseingeschränkte Menschen nutzbar; neue Formen von öffentlichem Verkehr sind denkbar, auch im Sinne einer weiteren Aufweichung der Grenzen zwischen Individualverkehr und öffentlichem Verkehr.

Der vorliegende Beitrag hat das Ziel, diese Optionen und die damit verbundenen Erwartungen vorzustellen. Dabei konzentrieren sich die Ausführungen und die Diskussion auf das Carsharing. In einem ersten Schritt wird der derzeitige Stand von Angebot und Nutzung der sogenannten „Neuen Mobilitätskonzepte“, bei denen das Carsharing den Kern bildet, dargestellt. Den Hauptteil des Beitrags bildet die Diskussion zu den Chancen und Herausforderungen, die sich durch die Einführung von autonom fahrenden Fahrzeugen in Carsharing-Flotten ergeben würden. Derzeit gibt es eine Reihe von Anzeichen dafür, dass Spontaneität und Flexibilität eine besonders hohe Bedeutung für die Nutzung der neuen Mobilitätskonzepte haben könnten (vgl. [11, 13]). Genau an dieser Stelle, nämlich der Erhöhung von Spontaneität und Flexibilität, könnten neue Mobilitätskonzepte mit autonomen Fahrzeugen ansetzen. Entsprechende Überlegungen sind bei Betreibern von flexiblen Carsharing-Flotten bereits im Entstehen [4].

---

## 9.2 Carsharing: „Kernapplikation“ neuer Mobilitätskonzepte

Carsharing gibt es in Deutschland und zahlreichen anderen Ländern etwa seit den 1980er-Jahren. Unter Carsharing wird hier der Betrieb einer Pkw-Flotte verstanden, die entweder stationsbasiert oder Punkt-zu-Punkt verfügbar ist. Jeder Inhaber und jede Inhaberin einer gültigen Fahrerlaubnis kann sich als Mitglied einer Carsharing-Organisation – in der Regel bei gleichzeitiger Entrichtung einer Anmeldegebühr – registrieren lassen und erhält damit Zugang zu den Fahrzeugen. Die wesentlichen Variationen des Carsharing ergeben sich aus den räumlichen und zeitlichen Zugriffsbedingungen auf die Fahrzeuge sowie aus den Geschäftsmodellen; Abb. 9.1 fasst die Ausprägung der verschiedenen Konzepte in ihren Grundzügen zusammen.



**Abb. 9.1** Systematik zur Pkw-Nutzung im Spannungsfeld zwischen privatem und kommerziellem Einsatz

### 9.2.1 Stationsbasiertes Carsharing

Die klassische Form des Carsharing ist das stationsbasierte Carsharing, d. h., an einem „Sammelpunkt“ werden die Fahrzeuge bereitgestellt. Der Nutzer muss das Fahrzeug dort abholen und auch wieder dorthin zurückbringen. Die Dauer der Nutzung wird vorab vereinbart. Im Unterschied zum klassischen Mietwagen können die stationsbasierten Carsharing-Fahrzeuge nicht nur tage-, sondern auch stundenweise entliehen werden; allerdings gibt es zunehmend auch bei Mietwagen-Anbietern die Möglichkeit zur stundenweisen Anmietung eines Fahrzeugs. Die Nutzer zahlen eine jährliche Grundgebühr; für die Fahrzeugnutzung wird ein aus Mietdauer und gefahrener Entfernung abgeleitetes nutzungsabhängiges Entgelt erhoben, das je nach Organisation und Anbieter variiert und auch der Nachfrage entsprechend an Tageszeit und Wochentag angepasst sein kann. Ein Geschäftsgebiet ist nicht festgelegt. In der Anfangszeit fand die Reservierung der Fahrzeuge überwiegend telefonisch statt, heute erfolgen Buchungen auch über die Anbieter-Website oder über Anwendungen auf mobilen Endgeräten.

Im Jahr 2014 ist stationsbasiertes Carsharing an circa 3900 Stationen in 380 Städten und Gemeinden Deutschlands verfügbar [5], [6]. Dazu gehört auch eine ganze Reihe mittlerer und kleinerer Städte; in Städten über 100.000 Einwohnern wird schon eine sehr gute Abdeckung erreicht, dagegen gibt es in Deutschland in weniger als 5 Prozent der Kommunen mit einer Einwohnerzahl von unter 50.000 ein Carsharing-Angebot [7]. Zur Bedienung der 3900 Stationen steht eine Flotte mit 7700 Fahrzeugen zur Verfügung, die von etwa 150 Carsharing-Anbietern bereitgestellt wird. Marktführer in Deutschland ist die Deutsche Bahn (Flinkster), der etwa 55 Prozent der stationsbasierten Flotte gehört [8, 9]. Weltweiter



Marktführer im klassischen Carsharing mit einer Flotte von rund 10.000 Fahrzeugen in den USA sowie Kanada, Großbritannien, Spanien und Österreich ist das im Jahr 2000 gegründete amerikanische Unternehmen Zipcar, das inzwischen zur AVIS Budget Gruppe gehört (Stand August 2014).

### 9.2.2 Flexibles (One Way) Carsharing

In den vergangenen Jahren sind neue Formen von Carsharing entstanden. Als neuen Typ des gewerblichen Carsharing gibt es inzwischen vor allem in Deutschland, aber auch in Großbritannien und den USA, das sogenannte „flexible“ Carsharing, dessen Flexibilität hauptsächlich darin besteht, dass keine vorherige Vereinbarung mit dem Betreiber über Zeitpunkt und Dauer der Nutzung getroffen und das Fahrzeug nicht an einem bestimmten Ort abgeholt und dorthin zurückgebracht werden muss. Vielmehr nehmen die Nutzer das Fahrzeug dort auf, wo sie es antreffen, und geben es an beliebiger Stelle innerhalb des vom Betreiber definierten Geschäftsgebietes ab. Die Informationen über den Standort ausleihbarer Fahrzeuge erhalten die Nutzer aus dem Internet oder über eine Smartphone-App; grundsätzlich kann das Fahrzeug auch *en passant* ausgeliehen werden, d. h., man leiht ein an der Straße geparktes, nicht reserviertes Fahrzeug aus. Auch hier ist die Registrierung beim Betreiber der Flotte Voraussetzung für die Nutzung des Fahrzeugs, die per Chipkarte oder neuerdings direkt über das Smartphone initiiert wird.

Das weltweit führende Unternehmen im flexiblen Carsharing ist Car2Go mit mehr als 10.000 Fahrzeugen in 27 Städten in Europa und Nordamerika (Stand August 2014). In Deutschland verfügen die Anbieter des flexiblen Carsharing über eine Flotte von insgesamt etwa 6250 Fahrzeugen [5], die allerdings fast ausschließlich in großen Städten mit mehr als 500.000 Einwohnern, so beispielsweise in Berlin, Hamburg oder München, angeboten werden. Dabei umfassen die Geschäftsgebiete nicht das gesamte städtische Territorium, sondern sind auf Teile davon beschränkt, hauptsächlich auf das Innenstadtgebiet sowie angrenzende Gebiete und „Inselgebiete“, in denen eine hohe Nutzungsfrequenz gegeben ist. Neben einer einmaligen Anmeldegebühr fallen keine weiteren regelmäßigen Kosten an. Die Nutzung der Fahrzeuge wird über einen zeitabhängigen Nutzungstarif, meist pro Minute, berechnet. Kosten für den Treibstoff sind wie beim stationsbasierten Carsharing in den Tarifen enthalten; darüber hinaus enthält die Nutzungsgebühr die Parkkosten, die üblicherweise als Pauschale direkt zwischen Anbieter und Kommune vereinbart sind.

Flexibles Carsharing startete als Pilotprojekt von Car2Go, einem Unternehmen des Daimler-Konzerns, im Jahr 2009 in Ulm (Baden-Württemberg, Deutschland). Weitere relevante Anbieter sind inzwischen das seit 2011 aktive DriveNow, ein Unternehmen von BMW und der Sixt-Autovermietung, sowie der mit rein batterie-elektrisch betriebenen Fahrzeugen ausgestattete Dienst Multicity, einer Kooperation von Citroën mit der Deutschen Bahn. Gleichzeitig versuchen sich zunehmend neue Anbieter im Markt, wie beispielsweise Quicar, das der Volkswagen-Gruppe angehört, oder Spotcar von Opel, das im Juni 2014 in Berlin gestartet ist.

### 9.2.3 Peer-to-Peer Carsharing

Das Peer-to-Peer Carsharing, also das Verleihen des privaten Pkw zwischen Privatpersonen, ist eben erst dabei, sich als dritte Systemform des Carsharing über Vermittlungsplattformen im Internet zu entwickeln. Genaue Nutzerzahlen liegen hierzu noch nicht vor. Die Buchungen werden beim Peer-to-Peer Carsharing über eine Internetplattform abgewickelt. Es gibt für das Abholen und Zurückbringen keine Station, vielmehr wird das Fahrzeug an einem individuell vereinbarten Standort abgeholt bzw. dorthin zurückgebracht. Der Blick auf eine Webplattform wie [www.autonetzer.de](http://www.autonetzer.de) zeigt, dass diese Form des Carsharing sich keineswegs nur auf die großen Städte beschränkt, sondern auch in kleineren Städten und Kommunen zu finden ist. Darin scheint sich die Vermutung von Hampshire und Gaites ([10], S.14) zu bestätigen, dass es sich bei Peer-to-Peer Carsharing – zumindest derzeit noch im Gegensatz zum kommerziellen Carsharing – um eine skalierbare Form des Carsharing handelt. Dabei ist die Flottenzusammensetzung ausgesprochen dynamisch, da es sich bei der Bereitschaft zum Verleihen des Pkw nicht um eine grundsätzliche Verhaltensweise seitens der Anbieter zu handeln scheint. Vielmehr legen die Ergebnisse einer Untersuchung in Berlin die Annahme nahe, dass die Pkw-Besitzer ihre Fahrzeuge nur in bestimmten Zeiten zur Verfügung stellen, beispielsweise dann, wenn die eigene Nutzung des Pkw aus persönlichen Umständen heraus gering ist [11].

---

## 9.3 Nutzer und Nutzung der neuen Mobilitätskonzepte

Die Zielsetzungen, die mit Carsharing verbunden werden, variieren je nach Perspektive der beteiligten Akteure. Seitens der Politik, die in Deutschland hauptsächlich auf kommunaler Ebene in die Bereitstellung der notwendigen Rahmenbedingungen für die Implementierung von Carsharing eingebunden ist, sind die Reduzierung des Verkehrsaufkommens mit dem Pkw (da Carsharing-Nutzer mit der Dauer der Carsharing-Nutzung auch den ÖPV-Anteil innerhalb ihres Modal Split erhöhen) und damit verbunden eine Verringerung der Emissionen von Luftschadstoffen und CO<sub>2</sub> sowie die Minderung des Flächenanspruches des ruhenden Pkw-Verkehrs wesentliche Motive bei der Unterstützung von Carsharing-Initiativen (vgl. Kap. 19). Kommerzielle Betreiber von Carsharing, wie Automobilhersteller (in der Regel in Kooperation mit Autovermietern) oder Mobilitätsdienstleister wie die Deutsche Bahn, verfolgen mit Carsharing produktbezogene Strategien, so u. a. die Erweiterung ihres Leistungsangebotes durch eine (zusätzliche) Mobilitätsdienstleistung oder die Bereitstellung von attraktiven Fahrzeugen ihrer Marke und damit die Erzeugung von Markenbindung. Andere Motive für den Betrieb einer Carsharing-Flotte sind dezidiert ökologische Zielsetzungen, die wesentlich die Entstehung von Carsharing angetrieben haben und die insbesondere von den als Verein oder als Interessengemeinschaft organisierten Gruppen weiterhin aufrechterhalten werden [12], [13].

### 9.3.1 Nutzer und Nutzungsvoraussetzungen

Die Carsharing-Nutzer des Jahres 2014 bilden eine spezifische Gruppe sowohl hinsichtlich ihrer Zusammensetzung als auch hinsichtlich ihres Mobilitätsverhaltens. Deutlich höher verglichen mit dem Bevölkerungsdurchschnitt sind: der Anteil an Personen unter 40 Jahren, der Anteil an Männern, der Anteil an Personen mit hohem formalem Bildungsstand (Abitur, Fachhochschulreife, Studium) und das Haushaltseinkommen. Diese Differenz zum Bevölkerungsdurchschnitt ist beim flexiblen Carsharing noch stärker ausgebildet als beim stationsbasierten [8], [9]. Beide Typen von Carsharing – stationsbasiert und flexibel – werden kombiniert mit einer weit überdurchschnittlichen Nutzung des öffentlichen Verkehrs. So zeigen Untersuchungen zur Nutzung von Carsharing aus dem Jahr 2014, dass 52 Prozent der Flinkster-Kunden in Berlin und 44 Prozent der Münchner Flinkster-Kunden eine ÖPV-Zeitkarte besitzen. Bei den flexiblen Systemen DriveNow und Car2Go verfügt ebenfalls ein hoher Anteil über ein ÖPV-Abo: Bei DriveNow in Berlin und München sind es 43 Prozent bzw. 38 Prozent ([14], S.12); bei Car2Go haben 40 Prozent der Nutzer in Stuttgart und 50 Prozent der Nutzer in Köln eine Dauerkarte für den öffentlichen Verkehr ([15], S.13); im Bundesdurchschnitt liegt der Anteil der Bevölkerung, die in Kernstädten wohnt und eine Zeitkarte für den öffentlichen Verkehr besitzt, bei 33 Prozent ([1], eigene Auswertung; die amtliche Raumbearbeitung in Deutschland zählt zur Kategorie „Kernstadt“ alle kreisfreien Städte mit mehr als 100.000 Einwohnern).

Ein gut ausgebauter öffentlicher Verkehr oder der Besitz eines eigenen Fahrzeugs scheinen derzeit wesentliche Voraussetzungen für die Nutzung von Carsharing zu sein. In der Variante des flexiblen Carsharing ist nur so eine One-Way-Nutzung möglich. Müsste der Nutzer diejenigen Wege, die nicht mit einem Carsharing-Fahrzeug zurückgelegt werden, selbst anderweitig organisieren, wäre der Aufwand höchstwahrscheinlich hoch und die Attraktivität eines Systems, das die Nutzung einzelner Strecken erlaubt, würde deutlich sinken. Auch im Fall von stationsbasiertem Carsharing bildet der öffentliche Verkehr häufig das hauptsächliche Verkehrsmittel für die Nutzer; vielfach stellt das Carsharing-Fahrzeug auch die bedarfsweise Ergänzung Pkw-besitzender Haushalte um ein weiteres Fahrzeug dar [16]. Um diesen Bedarf zu bedienen und im Sinne einer Symbiose auszunutzen, existieren seit Langem schon Kooperationen zwischen den Anbietern von stationsbasiertem Carsharing und öffentlichen Verkehrsdienstleistungen; eine vergleichbare Zusammenarbeit findet sich auch beim neuen flexiblen Carsharing [17].

### 9.3.2 Der Carsharer – der „neue Mensch“ in einer Sharing Economy?

Unter dem Schlagwort vom „Nutzen statt besitzen“ wird Carsharing immer wieder als Beispiel für den Wandel der Besitz-Ökonomie hin zu einer Ökonomie des Teilens, einer *Sharing Economy*, herangezogen [18, 19]. Möglicherweise resultiert dies aus der besonderen Offensichtlichkeit des Carsharing als eines Tuns, das im öffentlichen Raum stattfindet. Möglicherweise steht dahinter aber auch das Staunen darüber, dass ein Gegenstand, der

nach wie vor zum Statussymbol taugt, im Verleihverfahren von mehreren, beliebigen Personen genutzt wird.

Tatsächlich reiht sich das Carsharing ein in eine ganze Reihe von Entwicklungen, bei denen „Güter“ auf Leihbasis „geteilt“ werden, die bislang als nicht verleihbar galten: die selbst genutzte Wohnung, der Schrebergarten, das Auto. Ökonomen begründen die Verleihbarkeit (oder Nicht-Verleihbarkeit) eines Gutes mit der Differenz zwischen den entstehenden Transaktionskosten und den Einnahmen, die über den Verleih generiert werden können; entsteht eine positive Differenz, ist der Verleih begründet, und er ist umso interessanter, je höher die Differenz ausfällt [20]. Das Verleihen wird für den Einzelnen jedoch nur dann sinnvoll, wenn er über ein Produkt verfügt, dessen Kapazität er unvollständig nutzt – deshalb der Verleih des eigenen Autos in Standzeiten, der Verleih der Wohnung, solange man selbst im Urlaub ist, der Verleih des privaten Parkplatzes vor dem Haus, während man tagsüber bei der Arbeit ist.

Die Auseinandersetzung mit den Wirkungen eines geteilten Nutzens stammt – zumindest in Deutschland – im Wesentlichen aus der Diskussion um die nachhaltige Nutzung von Ressourcen [21, 22, 23]. Dabei zeigt sich das Sharing auf aggregierter Ebene, d. h. auf regionaler, nationaler oder auch supra-nationaler Ebene, als eine Möglichkeit zur Ressourceneinsparung. Auf individueller Ebene dagegen bedeutet Sharing nicht weniger Konsum, sondern die Möglichkeit zu gleichbleibend hohem oder auch mehr Konsum. Als Beispiel hierfür kann in der Tat das Carsharing angesehen werden, bei dem den Mitgliedern der jeweiligen Organisation eine Vielfalt an Fahrzeugen oder doch mehrere Fahrzeugtypen zur Verfügung gestellt werden. Diese Fahrzeuge bieten eine Breite an Konsumgütern des Typs Fahrzeug, die die Möglichkeiten von Privathaushalten mehrheitlich übersteigen würden, wenn sie diese Bandbreite an Fahrzeugen selbst besitzen wollten. Auf aggregierter Ebene werden weniger Fahrzeuge benötigt (der Bundesverband Carsharing (BCS) gibt an, dass sich – rein rechnerisch – im stationären Carsharing 42 Personen, im flexiblen Carsharing 70 Personen ein Fahrzeug teilen [5]); auf individueller Ebene bleibt damit eine hohe Mobilität gewährleistet.

In den Anfangsjahren war das Carsharing oft verbunden mit einer Einstellung, bei der dem Autofahren als solchem kein „Handlungsnutzen“ zugesprochen wurde – sprich: Auto-Nutzer mit einer entsprechenden Einstellung empfanden keinen Spaß am Autofahren (vgl. [21], S.92). Vielmehr war die Nutzung eher aus einer Einstellung heraus motiviert, die der wachsenden Motorisierung der privaten Haushalte eine wesentliche Mitverantwortung an der Verschlechterung der Umweltbedingungen gab, der die Carsharing-Mitglieder entgegenwirken wollten [12]. Dies hat sich möglicherweise grundlegend geändert. So hat sich das Produkt Carsharing – sowohl in der flexiblen und zunehmend auch in der stationsbasierten Version – zu einem kommerziellen Produkt entwickelt. Darüber hinaus belegen Untersuchungen zur Nutzung von flexiblem Carsharing, dass Aspekte wie „Aufmerksamkeit, erlebte Sympathie, Spaß und Begeisterung“ ganz wesentliche Motive sind (vgl. [24] S.21: Zustimmungsraten zu entsprechenden Aussagen zwischen 38 und 86 Prozent). Damit übernimmt das Carsharing-Fahrzeug bzw. die Carsharing-Nutzung emotionale und psychosoziale Funktionen, die dem Auto bislang nur in Form von Eigentum zugesprochen wurden

[22]. Bardhi und Eckhardt verstehen das „Teilen“ (von den Autorinnen zutreffender als *access-based consumption* bezeichnet) als charakteristisches Merkmal einer *liquid society*, in der feste Bezugssysteme, wie sie auch durch Eigentum entstehen, zunehmend brüchig werden [24].

---

## 9.4 Digitalisierung der Alltagswelt als Grundvoraussetzung für neue Mobilitätskonzepte

Die Entwicklung und Erweiterung des Carsharing durch neue Konzepte wie das flexible Carsharing oder auch das Peer-to-Peer Carsharing ist ohne die Verfügbarkeit von Geräten, die einen mobilen Zugriff auf das Internet und Kommunikationsanwendungen wie beispielsweise Apps erlauben, nicht denkbar. Zwar präsentieren alle Anbieter ihr jeweiliges Carsharing-Produkt auch umfangreich im (stationären) Internet; hierbei geht es aber eher um die Information für die (potenziellen) Kunden als um die unmittelbare Nutzung des Dienstes. Für den Zugang zu den Fahrzeugen spielen vor allem die mobilen Anwendungen eine wesentliche Rolle. Sie ermöglichen zunächst die Verortung von Nutzer und Fahrzeug(en) in Echtzeit; damit erhält der Nutzer die notwendige Grundlage, um sich über die Verfügbarkeit eines Fahrzeuges zu informieren und zu entscheiden, ob er den Weg zum Fahrzeug (für den er derzeit je nach Anbieter zwischen 15 und 30 Minuten zur Verfügung hat) zurücklegen will und kann. Im zweiten Schritt ermöglicht die mobile Anwendung die Reservierung des ausgewählten Fahrzeugs und bietet eine Navigation zu diesem Fahrzeug an. Auch das Öffnen des Fahrzeugs erfolgt bei einzelnen Anbietern schon heute über die mobile Anwendung.

Dabei ist die Einsatzmöglichkeit entsprechender Technologien entscheidend davon abhängig, dass die Nutzer ihrerseits über die technische Ausstattung verfügen, mit der sie auf das mobil und digital vermittelte Fahrzeugangebot zugreifen können. Tatsächlich hat der private Besitz von Smartphones in den vergangenen Jahren erheblich zugenommen. Während im Jahr 2009 erst knapp 6,5 Millionen Personen in Deutschland ein Smartphone besaßen, sind es heute über 40 Millionen, also fast jede(r) Zweite. Für das Jahr 2014 wird erwartet, dass 97 Prozent der verkauften Handys Smartphones sein werden; gerechnet wird mit dem Verkauf von fast 30 Millionen Geräten [25, 26].

Gleichzeitig ist davon auszugehen, dass die Fertigkeiten im Umgang mit Hard- und Software in allen Gruppen der Bevölkerung zunehmen. So stellt beispielsweise die ARD-ZDF-Onlinestudie 2013 fest, dass die Zahl der Internetnutzer weiterhin expandiert [27]: Im Jahr 2013 waren in Deutschland 54,2 Millionen Personen ab 14 Jahren zumindest gelegentlich online; das sind 77,2 Prozent der Bevölkerung und damit 800.000 Menschen mehr als noch im Vorjahr. Verursacher dieses Wachstums ist ausschließlich die Bevölkerungsgruppe der über 50-Jährigen. Gleichzeitig nimmt die Nutzungsdauer zu: 2013 war der deutsche Internetnutzer im Schnitt 169 Minuten am Tag online, das sind 36 Minuten mehr als im Vorjahr. Einen beträchtlichen Anteil daran hat die Unterwegs-Nutzung des Internets, die im Jahr 2012 erst von 23 Prozent der Nutzer praktiziert wurde, im Jahr 2013 aber bereits von

41 Prozent. Apps werden von fast der Hälfte der Online-Nutzer (44 Prozent) auf unterschiedlichen Endgeräten genutzt [28].

Im verkehrlichen Kontext besonders beachtenswert ist die durch digitale Anwendungen gegebene und durch mobile Endgeräte noch deutlich verstärkte Möglichkeit zur Reduzierung von Planungshorizonten. Spontaneität in der Gestaltung der individuellen Mobilität ist damit eine besonders wichtige Konnotation zum meistgebrauchten Begriff der „Flexibilität“ als spezifischer Eigenschaft der neuen Mobilitätskonzepte. Entsprechend war das mit der höchsten Zustimmung versehene Statement in einer im Jahr 2014 durchgeführten Befragung von Car2Go-Nutzern: „Ich finde an Car2Go attraktiv, dass ich spontan ein Auto nutzen kann, auch wenn ich ohne Auto unterwegs bin“ – 98 Prozent der Befragten stimmten dieser Aussage zu (72 Prozent „trifft genau zu“, 26 Prozent „trifft eher zu“) (vgl. [15], S.20). Damit wird auch der schnelle Erfolg des flexiblen Carsharing nachvollziehbar, das von der (langen) Vorausplanung, wie sie beim konventionellen stationsbasierten Carsharing notwendig war, entbindet und zumindest mittelfristig auch dem privaten Pkw den bislang geltenden Vorteil der permanenten Verfügbarkeit nehmen könnte (vgl. dazu auch [22], S.64).

Insgesamt bedeutet dies, dass wohl kaum mit größeren Zugangshürden seitens der (potenziellen) Nutzer zu rechnen ist, sofern künftige Mobilitätskonzepte an Praktiken anknüpfen, wie sie bereits heute geübt werden („geübt“ im wahrsten Sinne des Wortes; s. analog dazu die Einübung der Interaktion zwischen Mensch und Computer bei der Fahrzeugnavigation Kap.3). Wenig wahrscheinlich, wenngleich immer wieder auch von wissenschaftlicher Seite ins Feld geführt, erscheint allerdings die Umstellung der kompletten Fahrzeugflotte auf Fahrzeuge, die als Sharing-Fahrzeuge oder als Fahrzeuge von Betreibern öffentlicher Verkehre unterwegs sind. Es gibt derzeit keinerlei Anzeichen dafür, dass der private Pkw an Attraktivität verliert; laut Kraftfahrtbundesamt (KBA) gab es zum 1. Januar 2014 einen neuen Höchststand beim Fahrzeugbestand in Deutschland. Der Pkw-Bestand war zwischen 2013 und 2014 um rund 500.000 Fahrzeuge angewachsen und fügt sich damit in einen längerfristigen Wachstumstrend ein [29].

---

## **9.5 Weiterentwicklung der neuen Mobilitätskonzepte durch Automatisierung des Carsharing?**

Für die Weiterentwicklung der vorhandenen Carsharing-Konzepte durch autonome Fahrzeuge gibt es eine Reihe von Varianten, die sich analog zu den in Kap. 2 abgebildeten Anwendungsfällen – im Folgenden „Use-Cases“ – verhalten. Diese Varianten zielen auf unterschiedliche Nutzerbedürfnisse ab, die so auch heute schon adressiert werden, allerdings über den Selbstfahrer. Im Folgenden soll entlang der Use-Cases „Autonomes Valet-Parken“, „Vollautomat mit Verfügbarkeitsfahrer“ und „Vehicle-on-Demand“ diskutiert werden, welche Veränderungen Carsharing durch die Einflottung autonomer Fahrzeuge erfahren würde und welche Wirkungen für den Nutzer sich davon erwarten lassen. Dabei wird auch der Wettbewerb mit derzeit bestehenden Transportangeboten anzusprechen sein.

Bei allen Use-Cases wird der höchste Automatisierungsgrad unterstellt, das ist nach der Nomenklatur der BAST der Automatisierungsgrad „vollautomatisiert“ [30]. Der Unterschied zwischen den Use-Cases liegt in den dafür definierten Anwendungsfällen: Während es beim autonomen Valet-Parken ausschließlich um das Abstellen bzw. Holen des Fahrzeugs geht, bezieht sich der Vollautomat mit Verfügbarkeitsfahrer auf grundsätzlich jeden im Straßenverkehr denkbaren Anwendungsfall, wenngleich der Schwerpunkt auf Situationen mit vergleichsweise einfachen Mischverkehren liegt, d. h. auf Verkehren, wie sie beispielsweise auf Autobahnen gegeben sind, wo jedoch auch hohe Geschwindigkeiten die Regel sind. Beim Vollautomat mit Verfügbarkeitsfahrer muss der Fahrer die Fahraufgabe dann zeit- und streckenabschnittsweise übernehmen, wenn er Streckenabschnitte durchqueren möchte, die permanent oder temporär von der Freigabe für autonomes Fahren ausgenommen sind. Das Vehicle-on-Demand ist ebenfalls in der Lage, jeden im Straßenverkehr denkbaren Anwendungsfall zu bewältigen, und zwar auch Situationen mit Mischverkehren. Durch den Verzicht auf den sogenannten Fahrerarbeitsplatz, also den Sitzplatz, von dem aus der Fahrer oder die Fahrerin die Fahraufgabe ausführt, sind die Nutzungsmöglichkeiten des Fahrzeuginnenraums deutlich vielfältiger als beim Valet-Parken oder beim Vollautomaten mit Verfügbarkeitsfahrer.

### 9.5.1 Autonomes Valet-Parken im Carsharing

Der Use-Case des autonomen Valet-Parkens geht davon aus, dass das Fahrzeug sich selbstständig vom Parkplatz zum Nutzer bzw. vom Nutzer zum Parkplatz bewegen kann, auch unter Verwendung einer öffentlichen Straße.

Der Einsatz von autonomem Valet-Parken im Carsharing würde zunächst bedeuten, dass der Aufwand des Nutzers für die Beschaffung des Fahrzeugs und für die an die Nutzung sich anschließende Parkierung deutlich sinken würde. Vielmehr entstünde nun aus der Sicht des Nutzers ein Tür-zu-Tür-Service – vergleichbar mit einer Taxifahrt, bei der allerdings der Nutzer die Fahraufgabe bei der eigentlichen Fahrt selbst übernimmt. Die für Mobilität aufzuwendende Zeit würde in jedem Fall reduziert, da Zu- und Abgangszeiten entfallen.

Um die Attraktivität des Angebots zu steigern, wären – unabhängig von der Automatisierung – Erweiterungen denkbar in Hinblick auf Wahlmöglichkeiten bei der Ausstattung des Fahrzeugs, der Anzahl der Sitzplätze und der Transportkapazität oder auch Internetverfügbarkeit und Multi-Media-Angebote. Wie stark differenziert die Wahlmöglichkeiten sein könnten, wäre – wie auch beim heutigen Carsharing – abhängig von der Flottengröße, der Anzahl an (potenziellen) Kunden pro Fahrzeug und der Größe des Geschäftsgebietes, aber auch von der Zahlungsbereitschaft der Kunden für unterschiedliche Ausstattungsvarianten. Bei einer großen Flotte wäre es auch denkbar, die Fahrzeugdifferenzierung mit einer preislichen Differenzierung zu hinterlegen, vergleichbar der gängigen Praxis beim stationsbasierten Carsharing oder auch der klassischen Autovermietung. Dem stehen im flexiblen Carsharing derzeit Geschäftsmodelle gegenüber, die für die Nutzer möglicherweise da-

durch einen zusätzlichen (An-)Reiz bieten, dass sie aus der bestehenden Flotte eine große Bandbreite an Fahrzeugen zu den gleichen Kosten bekommen können.

Mit dem autonomen Valet-Parken wird das Bereitstellen von Fahrzeugen an einer Station grundsätzlich überflüssig; das gesamte Carsharing-Angebot ließe sich damit auf flexibles Carsharing umstellen, zumindest würde die Abholung und Rückführung des Fahrzeugs durch den Nutzer überflüssig werden. Zwar werden die Betreiber nicht auf Stationen oder Fahrzeugdepots verzichten, um eine gewisse Zentralisierung und damit Effizienz bei der Wartung der Fahrzeuge zu erzielen. Diese Stationen müssten dann aber nicht mehr in möglichst großer räumlicher Nähe zum Kunden aufgebaut werden, sondern könnten Flächen nutzen, für die geringere Kosten entstehen. Die Distanz zu den Orten der Nutzung ist dabei nicht beliebig, da für den Weg zum Kunden nur ein vergleichsweise enges Zeitfenster zur Verfügung stehen dürfte. Außerdem ist die Anfahrt zum Kunden mit dem Verbrauch von Ressourcen verbunden und stellt gleichzeitig – sofern keine andere Nutzung auf diesem Weg möglich ist – „tote“ Zeit im Fahrzeuggebrauch dar.

Alternativ oder ergänzend dazu könnten mehrere kleinere Sammelpunkte mit einigen wenigen Fahrzeugen relativ dicht verteilt über das Geschäftsgebiet entstehen. Damit würde der Zeitaufwand zwischen Fahrzeugbestellung und Abholung des Nutzers gering gehalten; möglich wäre dann auch eine Mischform der Fahrzeuginanspruchnahme mit wahlweise autonomer Zufahrt oder persönlicher Abholung. Damit ließen sich die aktuell noch sehr unterschiedlichen Zugangszeiten zu den Fahrzeugen, je nach kleinräumiger Dichte der Fahrzeugverfügbarkeit, deutlich nivellieren. Momentan liegen die Zugangszeiten, berechnet aus dem Unterschied zwischen den gemessenen Werten „Buchungszeitpunkt/Reservierung“ und „Fahrtdauer“, zwischen 1–16 Minuten (Beispielsfall Drive-Now mit maximaler Reservierungszeit von 15 Minuten; Quelle: Projekt WiMobil, gefördert vom Bundesumweltministerium BMUB). Die Unterschiede in der durchschnittlichen Dauer der Zugangszeit hängen unmittelbar mit den unterschiedlichen Fahrtzwecken zusammen.

### **9.5.2 Carsharing unter Einsatz von „Vollautomaten mit Verfügbarkeitsfahrer“**

Der Use-Case des Vollautomaten mit Verfügbarkeitsfahrer geht davon aus, dass sich das Fahrzeug grundsätzlich selbstständig auf öffentlichen Straßen bewegen kann, dass aber die Fahraufgabe individuell und zeitweise vom Fahrer oder der Fahrerin wieder übernommen wird.

Aus einer Carsharing-Perspektive bleiben die mit dem „Vollautomaten“ möglichen Veränderungen und Erweiterungen deutlich hinter dem autonomen Valet-Parken zurück, zumindest dann, wenn der Verfügbarkeitsfahrer als Fahrzeuginsasse vorausgesetzt wird. Der einzige Unterschied, der sich in diesem Use-Case zum heutigen Carsharing ergeben würde, wäre die Möglichkeit, während der Fahrt die Fahraufgabe an das Fahrzeug abzugeben, wenn der Fahrer dies wünscht. Manche Streckenabschnitte können für die autonome



Fahrfunktion allerdings auch dauerhaft nicht zugelassen sein, „z.B. Strecken mit einer hohen Fußgängerüberquerfrequenz“ (s. Kap. 2). Dies wären allerdings vor allem Bereiche im städtischen Umfeld, das – zumindest zum jetzigen Zeitpunkt – das Hauptnutzungsgebiet für das flexible Carsharing darstellt.

Die Erweiterung von Carsharing mit Fahrzeugen im Sinne des Vollautomaten mit Verfügbarkeitsfahrer würde demnach eher auf Strecken am Rand oder außerhalb von Siedlungen einen nachvollziehbaren Nutzen erzeugen. Allerdings lässt sich daraus wohl kaum ein Geschäftsmodell für ein „Carsharing im ländlichen Raum“ ableiten, da durch die Notwendigkeit des Verfügbarkeitsfahrers eine Bedienung des Geschäftsgebietes über ein Fahrzeug, das die Zufahrt und Wegfahrt selbstständig übernimmt, nicht möglich ist.

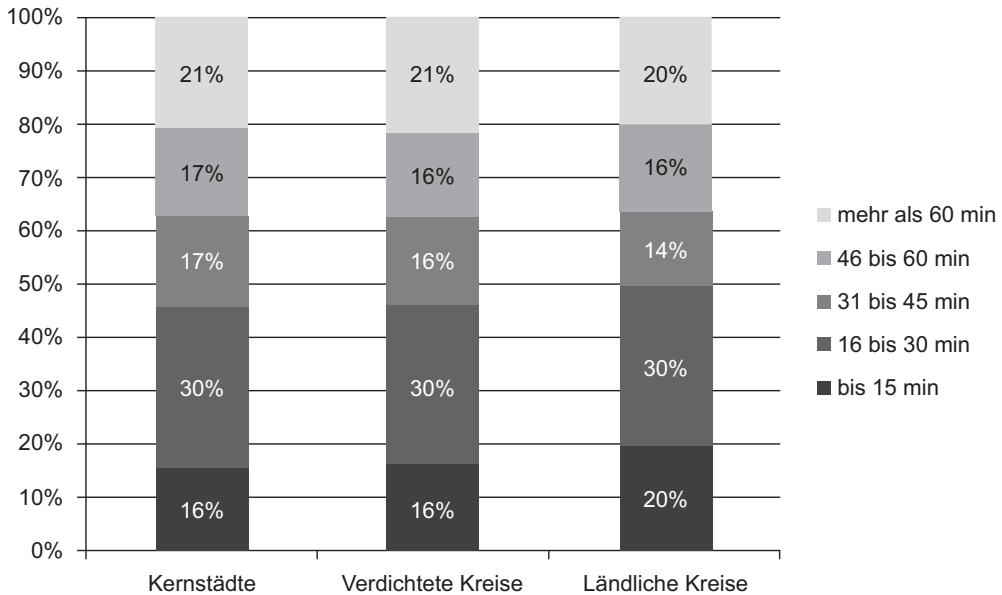
Insgesamt ist der Einsatz des Vollautomaten mit Verfügbarkeitsfahrer den Möglichkeiten, die sich durch autonomes Valet-Parken ergeben würden, deutlich unterlegen.

### 9.5.3 Das Carsharing-Fahrzeug als Vehicle-on-Demand

Der Use-Case des Vehicle-on-Demand geht davon aus, dass sich das Fahrzeug selbstständig auf allen öffentlichen Straßen bewegt. Ein Fahrer ist – auch als Rückfallebene – nicht notwendig. Damit wird auch kein Fahrerarbeitsplatz mehr benötigt, was neue Gestaltungsmöglichkeiten für den Innenraum des Fahrzeugs eröffnet.

Als Carsharing-Fahrzeug verfügt das Vehicle-on-Demand zunächst über die gleichen Vorteile wie das Carsharing-Fahrzeug mit der Funktion des Valet-Parkens, allerdings wird aus dem Fahrzeug zusätzlich eine Art „auf der Straße rollendes Abteil“. Damit sind in diesem Fahrzeug ganz unterschiedliche Beschäftigungen möglich, wie z. B. das Lesen, Spielen, Telefonieren, Arbeiten oder Dösen, und der Nutzer kann dazu jeden beliebigen Platz im Fahrzeug einnehmen. Unterstellt man Nutzungsdauern, wie sie heute im flexiblen Carsharing üblich sind, erscheint es jedoch offen, ob der Zusatznutzen, der durch den Wegfall der Fahraufgabe entsteht, tatsächlich hoch bewertet wird – so liegt beispielsweise die durchschnittliche Nutzungsdauer eines Fahrzeugs in einer Flotte wie der von DriveNow im Jahr 2014 bei rund einer halben Stunde [31]. Geht man davon aus, dass autonom fahrende Carsharing-Fahrzeuge für alle im Laufe eines Tages anfallenden Arbeitswege genutzt werden, würde diese Zeitspanne in den größeren Städten nach heutigem Stand durchschnittlich 54 Minuten ausmachen, für Menschen, die im Umland der größeren Städte oder im ländlichen Raum wohnen, beträgt der Gesamtaufwand für Arbeitswege während eines Werktages derzeit 50 bzw. 49 Minuten (Datenquelle: MiD 2008, [1]). Dabei gibt es nahezu keinen Unterschied hinsichtlich der Zeitaufwände, die in den verschiedenen Raumtypen für Arbeitswege mit dem Auto aufgewendet werden (s. Abb. 9.2).

Die Fahrt in einem Vehicle-on-Demand im Carsharing würde einer Fahrt mit dem Taxi ähneln, und da das Fahrzeug einem breiten Nutzerkreis zur Verfügung steht, höchstwahrscheinlich auch Taxifahrten ersetzen. Dies wird jedoch in Abhängigkeit von den Kosten zu sehen sein, die für eine Fahrt mit einem autonomen Carsharing-Fahrzeug im Vergleich zum Taxi entstehen.

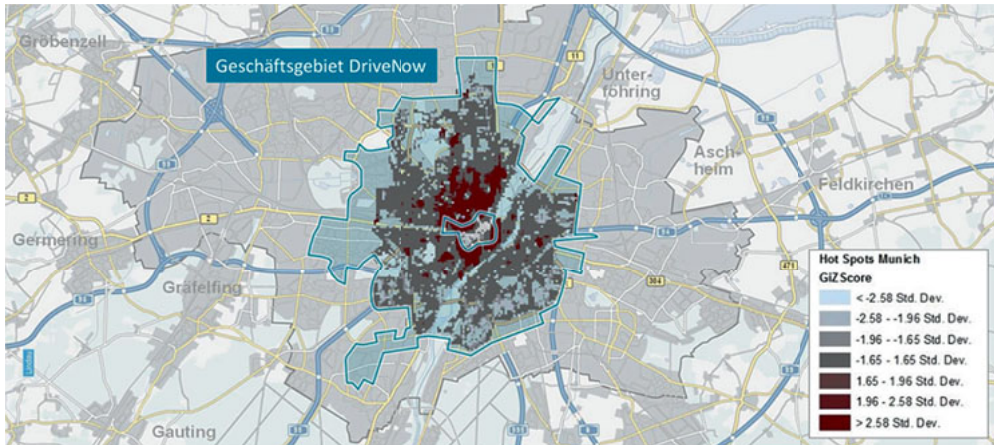


**Abb. 9.2** Unterwegszeit für Arbeitswege nach Kreistypen (Datenquelle: [1])

#### 9.5.4 Zwischenfazit

Vergleicht man verschiedene Varianten des Einsatzes autonomer Fahrzeuge im Carsharing, ist auf Seiten der Fahrzeugnutzer der Zugewinn an Komfort durch die Automatisierung der Fahraufgabe nicht grundsätzlich anders als beim privaten Fahrzeug. Auch im Fall von Carsharing wird die Fahrzeit frei für Beschäftigungen, die sich während der Fahrt mit einem autonomen Fahrzeug durchführen lassen. Der für das Carsharing wahrscheinlich entscheidende neuartige Nutzen entstünde bei der Zuführung des Fahrzeugs zum Nutzer und dem Entfernen des Fahrzeugs nach Abschluss des Nutzungsvorgangs.

Der Perspektive der Nutzer steht die der Betreiber gegenüber, die mit der Automatisierung des Zu- und Wegführens eine erhöhte Nutzungsfrequenz und Gesamtnutzungsdauer des einzelnen Fahrzeugs realisieren und damit die Rentabilität des Carsharing erhöhen könnten. Damit würden Unterschiede in der Nutzungsfrequenz, wie sie in Untersuchungen zum flexiblen Carsharing offenkundig werden, zumindest nivelliert. Derzeit steht die Nutzungsfrequenz in direktem Zusammenhang mit dem Standort, an dem das Fahrzeug verlassen wird. Hotspots in Innenstadtbereichen stehen Gebiete gegenüber, an denen die meisten dort abgestellten Fahrzeuge mehrere Stunden ungenutzt stehen (s. Abb. 9.3). Als durchschnittliche Nutzungsdauer geben Betreiber derzeit zwischen 62 und 78 Minuten pro Fahrzeug und Tag an [32]; damit ist das noch offene Potenzial einer zusätzlichen Auslastung der Fahrzeuge beträchtlich.



**Abb. 9.3** Buchungsintensität von Fahrzeugen im flexiblen Carsharing – das Beispiel DriveNow München [14], S. 18

GIZ-Score: Ein hoher positiver Wert bedeutet, dass es in dem betreffenden Gebiet zu einer hohen Anzahl von Buchungen kommt (je höher der Wert, desto mehr Buchungen), ein niedriger Wert bedeutet, dass es nur eine geringe Anzahl von Buchungen gibt (je geringer der Wert, desto weniger Buchungen).

## 9.6 Neue Mobilitätskonzepte jenseits von Carsharing: Hybridisierung des öffentlichen Verkehrs?

Während das Carsharing, insbesondere in seiner neuen Variante als flexibles Carsharing, besondere Aufmerksamkeit erfährt, auch im Zusammenhang mit der Automatisierung der Fahrzeuge, wird oft übersehen, dass sich auch für den öffentlichen Verkehr mit der Automatisierung neue Optionen für eine (weitere) Ausdifferenzierung des derzeitigen Angebots ergeben und damit weitere Formen neuer Mobilitätskonzepte entstehen könnten. Dabei ist es unverzichtbar, auch die jeweiligen raumspezifischen Bedingungen zu berücksichtigen.

Die im Zusammenhang mit dem öffentlichen Verkehr zu diskutierenden, grundsätzlich vorhandenen Optionen betreffen

- die Neugestaltung von Intermodalität und Flexibilisierung des öffentlichen Verkehrs,
- die Individualisierung des öffentlichen Verkehrs,
- die Verdichtung der Bedienungsmöglichkeiten mit öffentlichem Verkehr.

Der besondere Vorteil, der hierbei aus dem Einsatz von autonomen Fahrzeugen entstehen würde, beträfe die bedarfsangepasste Bedienung: Fixe Routenpläne könnten durch flexible Bedienung ergänzt werden. Die zusätzlichen Routen könnten nach den Anforderungen durch die Kunden optimiert werden. Fixe Abfahrtszeiten würden durch zeit-

lich optimierte Routenverläufe – entsprechend den Anforderungen seitens der Kunden – ersetzt.

Diese Individualisierung des öffentlichen Verkehrs kommt spätestens dann einer „Hybridisierung“ gleich, wenn jenseits der Flexibilisierung von Zeiten und Routen auch Auswahlmöglichkeiten hinsichtlich der zur Verfügung stehenden Fahrzeuge angeboten werden. Grundsätzlich ist die Überlegung, den öffentlichen Verkehr über das fahrzeugspezifische Angebot zu differenzieren, nicht neu. Allerdings hat sich dies aufgrund der Kosten, die beim Vorhalten unterschiedlicher Flotten mit entsprechendem Personal entstehen, bisher nur in sehr engen, meist touristischen Nischen durchsetzen können (z. B. das Cable Car in San Francisco, der Glacier Express in der Schweiz oder der Blue Train in Südafrika).

### 9.6.1 Neugestaltung von Intermodalität und Flexibilisierung des öffentlichen Verkehrs

Intermodalität wird definiert als der Wechsel zwischen unterschiedlichen Verkehrsmitteln im Verlauf eines Weges [33]. Folgt man dieser Definition, dann gibt es – zumindest in Deutschland – intermodales Verhalten in einem nur ganz geringen Umfang. Laut der Studie „Mobilität in Deutschland 2008“ trifft dies nur auf 1,3 Prozent aller Alltagswege zu [1]. Nicht berücksichtigt ist dabei allerdings das erhebliche Maß an Intermodalität innerhalb des öffentlichen Verkehrs, insbesondere in der Verknüpfung von Hauptstrecken mit Zu- bzw. Abgangsstrecken. Typisches Beispiel hierfür ist der Zugang zu S-Bahnen oder Regionalbahnen über eine Buslinie, wie er vor allem in suburbanen und ländlichen Gebieten besteht. In großen Städten ist die Intermodalität zwischen den unterschiedlichen Verkehrsmitteln S-Bahn, U-Bahn, Straßenbahn und Bus angesichts der Überlagerung der Netze der einzelnen Verkehrsmittel noch deutlich stärker ausgeprägt. Im Folgenden wird vor allem die Situation in städtischen Randgebieten und weniger dicht besiedelten (ländlichen) Räumen reflektiert. Vergleichbare Szenarien für die Stadt diskutiert Heinrichs in diesem Band (s. Kap. 11).

Die Neugestaltung von Intermodalität durch die Nutzung autonomer Fahrzeuge könnte analog zum derzeit bestehenden System über den privaten Pkw oder aber ein öffentliches System stattfinden. Im Alltagsverkehr würde die Durchführung des Zu- und Abgangs für die Hauptstrecke mit dem privaten Pkw in etwa dem entsprechen, was heute als *Kiss-and-Ride* bezeichnet wird: Eine Person bringt eine andere mit dem Pkw zum Verkehrsmittel der Hauptstrecke, verabschiedet sich und nimmt dann den Pkw wieder mit, um ihn (in der Regel tagsüber) während der Abwesenheit des oder der anderen nutzen zu können. Mit einem autonomen Fahrzeug entfielen diese Notwendigkeit des „Fahrdienstes“, zumindest dann, wenn kein Verfügbarkeitsfahrer im Fahrzeug anwesend sein muss. Das Muster des *Kiss-and-Ride* findet sich in ähnlicher Form auch beim Fernverkehr wieder, wo übrigens heute schon Carsharing-Betreiber wie DriveNow begonnen haben, ein spezielles Angebot für den Zu- bzw. Abgang zu Flughäfen, Bahnhöfen oder Fernbus-Bahnhöfen einzurichten – beispielsweise mit reservierten Parkplätzen am Flughafen oder durch die Gewährung vergünstigter Tarife bei intermodaler Nutzung von Fernbus und Carsharing-Fahrzeug [34].

Wird der Zu- und Abgang für die Hauptstrecke mit einem öffentlichen System durchgeführt, gäbe es mittels des autonomen Fahrzeugs die Möglichkeit, wesentlich gezielter auf die Nutzerbedürfnisse einzugehen. Die festen Routen und Abfahrtszeiten könnten entfallen; vielmehr könnten Abholzeiten und Abholorte individuell vereinbart werden. Wahrscheinlich würde eine größere Flotte kleiner und mittlerer Fahrzeuge für den Zu- und Abgang eingesetzt; das kleinräumige System des öffentlichen Verkehrs würde zu einem System mit einer Vielzahl von Sammeltaxis mit angepasster Kapazität. Trotz Automatisierung bliebe die logistische Herausforderung enorm. Dazu kommt als wesentliche Voraussetzung für ein Funktionieren des Systems, dass die Nutzer die Vereinbarungen mit dem Betreiber mit hoher Zuverlässigkeit einhalten. Dies gälte insbesondere hinsichtlich der Abfahrtszeiten, zumal dann, wenn auf den Hauptstrecken weiterhin von einem festen Fahrplan oder doch zumindest einer Taktung auszugehen ist.

Eine solche Umgestaltung des Systems könnte auch Überlegungen zur Finanzierung der Grundversorgung mit öffentlichem Verkehr neu beleben – einerseits in Richtung eines *Pay-as-you-drive*, aber auch in Richtung eines pauschalisierten, über Steuern oder Abgaben pro Kopf finanzierten Angebots an alle Einwohner, wie es für Städte immer wieder diskutiert wird. Eine hohe Bediendichte auch in suburbanen und sogar ländlichen Räumen würde eine flächendeckende Pauschalabgabe rechtfertigen und könnte dabei eine Maßnahme sein, mit der die Nutzung des privaten Pkw reduziert werden kann.

### 9.6.2 Individualisierung des öffentlichen Verkehrs

Die Individualisierung des öffentlichen Verkehrs durch autonome Fahrzeuge könnte dann über die Aufhebung von im Fahrplan festgelegten Abfahrtszeiten und Routen hinausgehen, wenn es tatsächlich zu einer Reduzierung der Fahrzeuggrößen – zumindest in bestimmten Teilen des Bedienebietes – kommen würde. Damit würde sich die Möglichkeit eröffnen, den Nutzern unterschiedliche Fahrzeugtypen und Fahrzeugausstattungen anzubieten, was derzeit in einer eher rudimentären Form mit dem Angebot von 1. und 2. Klasse im öffentlichen Verkehr erfolgt, jedoch nur im Schienenverkehr tatsächlich umgesetzt ist.

Als ein möglicher Einstieg in eine solche Individualisierung des öffentlichen Verkehrs lassen sich Werksbusse interpretieren, als neueres Beispiel sei hier der mit WLAN-Zugang ausgestattete Google-Bus in und um San Francisco genannt, der Arbeitnehmer der Firma zu ihrer Arbeitsstätte bringt. In diesem Fall trifft sich eine spezifische Community in einem gemeinsamen Shuttle. Vergleichbare Konzepte, wenn auch in einer Vielfalt an weiteren Spielarten, sind denkbar und erscheinen auf der Basis autonom fahrender Fahrzeuge besonders attraktiv.

Parallel dazu ist – auch aus privater Initiative heraus – die Entwicklung neuer Car Pooling-Konzepte denkbar, die einen Mix aus Gemeinschaftsbesitz und gemeinschaftlicher, aber zeitweise auch individueller Nutzung eines Fahrzeugs darstellen könnten. Heute beschränkt sich das Car Pooling im Wesentlichen auf die mittelfristig geplante oder relativ kurzfristige Bildung von Mitfahrgemeinschaften, bei denen das Fahrzeug vom

Eigentümer bereitgestellt wird, der gleichzeitig Fahrer ist. Auch neuere Dienste wie Uber ([www.uber.com](http://www.uber.com)) oder Lyft ([www.lyft.com](http://www.lyft.com)) weichen von diesem Prinzip nicht ab, sie bieten aber Taxi-ähnliche Dienste an und sind somit mit den klassischen Fahrgemeinschaften, die im Alltagsverkehr überwiegend aus einer festen Gruppe an Personen bestehen, nicht zu vergleichen. Die Vermutung liegt nahe, dass mit der Einführung von autonomen Fahrzeugen diese Mitfahrdienste obsolet werden und sich hin zu Peer-to-Peer Carsharing entwickeln.

### **9.6.3 Verdichtung der Bedienungsmöglichkeiten mit öffentlichem Verkehr**

In Verbindung mit dem Thema Intermodalität sind die Möglichkeiten einer dichteren Bedienung im öffentlichen Verkehr, auch in der Fläche, bereits weiter oben angesprochen worden (für den städtischen Raum s. Kap. 11). Diese aus dem Einsatz von autonomen Fahrzeugen resultierenden Vorteile gelten sowohl in räumlicher als auch in zeitlicher Hinsicht, d. h. sowohl für Räume an der Peripherie als auch für Randzeiten. Allerdings gilt auch hier – selbst unter Beachtung der Tatsache, dass Personalkosten für den Fahrer entfallen – eine wirtschaftliche Untergrenze, die sich aus der Nutzungsfrequenz ergibt. Das heißt auch, dass eine räumlich stark streuende Nutzung nur bis zu einem gewissen Umfang durch das Vorhalten einer größeren Flotte aufgefangen werden kann. In jedem Fall müssen sich auch die Investitions- und Betriebskosten für diese Fahrzeuge amortisieren.

---

## **9.7 Implementierung von neuen Mobilitätskonzepten mit autonomen Fahrzeugen**

Carsharing erregt derzeit nicht nur Aufsehen, weil neue Formen entwickelt werden, seine Sichtbarkeit deutlich zunimmt und die Zahl der Carsharing-Nutzer in den letzten beiden Jahren sprunghaft angewachsen ist, sondern auch, weil sich abzuzeichnen scheint, dass Carsharing, das in seiner kommerziellen oder von Vereinen getragenen Variante vom privaten Autobesitz unabhängig ist, ein geeignetes Vehikel werden könnte, um neue Fahrzeugtechnologien in den Markt einzuführen. Die Nutzer erhalten entsprechende Fahrzeuge über die Flotte ihres Anbieters und können sie – ohne Aufpreis gegenüber den herkömmlichen Fahrzeugen – ausprobieren. Tatsächlich geschieht dies derzeit im Umfeld von Elektromobilität, wo Unternehmen wie DriveNow und Car2Go, aber auch Citroën mit dem Multicity-Auto, Elektrofahrzeuge in ihre Carsharing-Flotte eingliedern. Seitens der Nutzer wird dies ausgesprochen positiv aufgenommen. Dazu berichten Projekte zum elektromobilen Carsharing zweierlei: Zum einen gelingt es, die neue Technologie zügig für einen großen Teil der Carsharing-Nutzer bereitzustellen und damit auch ihre Nutzung zu initiieren. Zum anderen suchen viele Nutzer auch ganz gezielt die über das Carsharing gegebene Möglichkeit, die neue Technologie zu testen und zu nutzen ([13], S.15; [15], S.19).

Schwieriger könnte die Einführung von autonomen Fahrzeugen im öffentlichen Verkehr werden, wenngleich die bisherigen Erfahrungen mit selbstfahrenden Schienenfahrzeugen derzeit weitestgehend positiv ausfallen, so z. B. bei der Pariser Metro-Linie 1, die seit 2012 vollautomatisiert ist [36], oder auch im Fall der Nürnberger U-Bahn zum Flughafen [37]. Allerdings gelten angesichts der räumlichen Abgrenzung des Bahnkörpers hier andere Bedingungen, als dies aller Voraussicht nach im Straßenverkehr der Fall wäre. Würde auch im Straßenverkehr das autonome Fahrzeug an eine feste Infrastruktur gebunden, würden daraus nicht nur erhebliche Kosten entstehen, sondern auch die Möglichkeiten zur Flexibilisierung von Routenführungen entfallen. Besonders wichtig erscheint deshalb der testweise Einsatz von autonomen Fahrzeugen in festgelegten, kleineren öffentlichen oder halböffentlichen Bereichen, wie er in Kap. 10 beschrieben wird. Eine vergleichbar offene „Experimentier-Philosophie“ lässt sich derzeit in Deutschland nicht feststellen.

---

## 9.8 Fazit

Die Weiterentwicklung von Carsharing-Systemen und die Veränderung des öffentlichen Verkehrs durch den Einsatz von autonomen Fahrzeugen erscheinen grundsätzlich möglich und an vielen Stellen auch mit einem eindeutig definierbaren Nutzen für die Verkehrsteilnehmer verbunden. Im Carsharing scheint der Einsatz eines vollautomatisierten Bring- und Hol-Dienstes im Sinne von Valet-Parken fast eine logische und notwendige Konsequenz zu sein, wenn mittelfristig Verfügbarkeit und Nutzung von Carsharing noch stärker in die Fläche gehen sollen.

Daneben ist heute schon absehbar, dass rund um Carsharing und Mitfahrdienste zahlreiche neue Ideen entstehen und ausgetestet werden, die in Verbindung mit einem autonomen Fahrzeug ein noch deutlich größeres Potenzial entwickeln könnten. So werden Mitfahrdienste entwickelt, die zusätzlich Betreuungscharakter besitzen, nicht nur für ältere Menschen, sondern auch für Kinder – wie dies derzeit Boost by Mercedes-Benz in Palo Alto (Kalifornien) vormacht. Auch hier zeigt sich die unmittelbare Verknüpfung von Mobilität und Informations- und Kommunikationstechnologien als Grundlage für die Organisation des Dienstes [38].

Völlig offen ist momentan die Frage der Kosten bzw. der Rentabilität; möglicherweise sollte diese Frage im Zusammenhang mit der Finanzierung des Systems gestellt werden. Auf Seiten der Nutzer muss sich ebenfalls erst noch zeigen, ob und inwieweit das *Pay-as-you-drive* über das Carsharing hinaus Akzeptanz findet. Auch an dieser Stelle wird erst experimentiert. So setzt beispielsweise Spotcar in seiner aktuellen Version der zeitabhängigen Abrechnung von Anbietern wie Car2Go und DriveNow eine kilometerabhängige Preisberechnung entgegen, um damit keine unmittelbare Kostenbelastung der Kunden für staubedingte Verzögerungen im städtischen Verkehr herbeizuführen. Im öffentlichen Verkehr beginnt derzeit erst die *Pay-as-you-Drive*-Ära mit Systemen wie Touch&Travel. Möglicherweise jedoch sind die Bezahlssysteme im Carsharing und vergleichbare Systeme im öffentlichen Verkehr Wegbereiter für den Einstieg in ein hoch flexibles System.

## Literatur

1. infas, DLR Alltagsverkehr in Deutschland. Struktur – Aufkommen – Emissionen – Trends. Abschlussbericht zum Projekt „Mobilität in Deutschland 2008“. Bonn und Berlin (2010)
2. Nobis, C. Multimodale Vielfalt. Quantitative Analyse multimodalen Verkehrshandelns. Dissertation, Humboldt-Universität zu Berlin (2014)
3. Beckmann, Klaus; Klein-Hitpaß, Anne (Hrsg.): Nicht weniger unterwegs, sondern intelligenter? Neue Mobilitätskonzepte. Edition difu Berlin (2013)
4. Spiegel Online: Carsharing mit selbst fahrenden Autos: Daimler eifert Google nach. erstmals veröffentlicht am 15. Juli 2014. <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/daimler-autobauer-plant-car-sharing-mit-autonom-fahrenden-smarts-a-980962.html>; Zugriff am 4. September 2014. (2014)
5. BCS (Bundesverband CarSharing): Datenblatt CarSharing in Deutschland Stand 01.01.2014. [http://www.carsharing.de/sites/default/files/uploads/presse/pdf/datenblatt\\_carsharing\\_in\\_deutschland\\_stand\\_01.01.2014.pdf](http://www.carsharing.de/sites/default/files/uploads/presse/pdf/datenblatt_carsharing_in_deutschland_stand_01.01.2014.pdf); Zugriff am 4. September 2014. (2014)
6. BCS (Bundesverband Carsharing): <http://www.carsharing.de/presse/pressemitteilungen/carsharing-boom-haelt-an>; Zugriff am 4. September 2014. (2014)
7. Breindl, K. CarSharing ist auch in kleinen Städten möglich. In: Bundesverband CarSharing e.V. (Hrsg.): Eine Idee setzt sich durch. 25 Jahre CarSharing. Brühl (kölner stadt- und verkehrsverlag) S.67–76. (2014)
8. Wirtschaftswoche Online: BMW, Daimler und Bahn erwägen Carsharing-Allianz. erstmals veröffentlicht am 5. Mai 2012. <http://www.wiwo.de/unternehmen/auto/mobilitaet-bmw-daimler-und-bahn-erwaegen-carsharing-allianz/6591352.html>; Zugriff am 4. September 2014. (2012)
9. Deutsche Bahn AG. 215.000 Kunden entscheiden sich für „Flinkster- Mein Carsharing“. Press information, January 2013. [http://www.diebahn-online.eu/de/presse/presseinformationen/pi\\_it/3216552/ubd20130124.html?start=50&itemsPerPage=20](http://www.diebahn-online.eu/de/presse/presseinformationen/pi_it/3216552/ubd20130124.html?start=50&itemsPerPage=20). Zugriff am 4. September 2014
10. Hampshire, R.; Gaites, C.: Peer-to-Peer Carsharing – Market analysis and potential growth. 90<sup>th</sup> TRB Annual Meeting, 23–27 January 2011, Washington D.C. (2011)
11. Gossen, M.: Nutzen statt Besitzen – Motive und Potenziale der internetgestützten gemeinsamen Nutzung am Beispiel des Peer-to-Peer Car-Sharing. Schriftenreihe des Instituts für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW) 202/12. (2012)
12. Loose, W. Wie alles anfang – CarSharing als Reaktion auf die Verkehrs- und Umweltsituation in den 90er Jahren. In: Bundesverband CarSharing e.V. (Hrsg.): Eine Idee setzt sich durch. 25 Jahre CarSharing. Brühl (kölner stadt- und verkehrsverlag) S.11–16. (2014)
13. Loose, W., Nobis, C.; Holm, B.; Bake, D.: Bestandsaufnahme und Möglichkeiten der Weiterentwicklung von Car-Sharing. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen – Verkehrstechnik, No.114. (2004)
14. DLR Institut für Verkehrsforschung, BMW, Bundeswehr-Universität München, Deutsche Bahn (2014): Wirkung von E-Car-Sharing-Systemen auf Mobilität und Umwelt in urbanen Räumen. Halbzeitkonferenz, Berlin, 3. Juli 2014. (2014)
15. Öko-Institut; Institut für sozialökologische Forschung (2014): SHARE – Forschung zum neuen Carsharing. Wissenschaftliche Begleitforschung zu Car2Go. Halbzeitkonferenz, Berlin, 3. Juli 2014. (2014)
16. Lichtenberg, J.; Hanel, F.: Carsharing und ÖPNV – Nutzen für beide? Eine Analyse der Situation in Frankfurt am Main. In: Der Nahverkehr H.11/2007, S.37–41. (2007)
17. Ackermann, T.; Loose, W.; Reining, C.: Die Verknüpfung von CarSharing und ÖPNV. In: Bundesverband CarSharing e.V. (Hrsg.): Eine Idee setzt sich durch. 25 Jahre CarSharing. Brühl (kölner stadt- und verkehrsverlag) S.111–122. (2014)
18. Scholl, G.; Hirschl, B.; Tibitanzl, F.: Produkte länger und intensiver nutzen. Zur Systematisierung und ökologischen Beurteilung alternativer Nutzungskonzepte. Schriftenreihe des Instituts für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW) 134/98. (1998)



19. Canzler, W. Der Öffentliche Verkehr im postfossilen Zeitalter: Sechs Thesen. In: Schwedes, O. (Hrsg.): Öffentliche Mobilität. Berlin, S.229–240. (2014)
20. Benkler, Y.: Sharing nicely: On shareable goods and the emergence of sharing as a modality of economic production. <http://christmasgorilla.net/longform/benkler-sharing-nicely.html>; Zugriff am 4. September 2014.(ohne Jahr)
21. Scholl, G.; Schulz, L.; Süßbauer, E.; Otto, S. Nutzen statt Besitzen – Perspektiven für ressourceneffizienten Konsum durch innovative Dienstleistungen. Ressourceneffizienz Paper 12.4, Berlin. (2010)
22. Einert, D.; Schrader, U.: Die Bedeutung des Eigentums für eine Ökologisierung des Konsums. Lehrstuhl Markt und Konsum, Forschungsbericht Nr. 36, Universität Hannover. (1996)
23. Heinrichs, H.; Grunenberg, H.: Sharing Economy – Auf dem Weg in eine neue Konsumkultur? Lüneburg, Centre for Sustainability Management. (2012)
24. Bardhi, F.; Eckhardt, G. M.: Access-based consumption: The case of Carsharing. Journal of Consumer Research, Vol. 39, S.881–898. (2012)
25. Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und Neue Medien e.V. (BITKOM): Smartphone-Boom setzt sich 2014 ungebrochen fort. erstmals veröffentlicht am 12. Februar 2014 [http://www.bitkom.org/de/presse/8477\\_78640.aspx](http://www.bitkom.org/de/presse/8477_78640.aspx); Zugriff am 4. September 2014. (2014)
26. Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und Neue Medien e.V. (BITKOM): Jeder zweite Smartphone-Besitzer installiert zusätzliche Apps. erstmals veröffentlicht am 17. Januar 2014 [http://www.bitkom.org/de/presse/8477\\_78640.aspx](http://www.bitkom.org/de/presse/8477_78640.aspx); Zugriff am 4. September 2014. (2014)
27. ARD-ZDF-Onlinestudie 2013. <http://www.ard-zdf-onlinestudie.de/index.php?id=419>(2013)
28. ARD-ZDF-Onlinestudie 2013. <http://www.ard-zdf-onlinestudie.de/index.php?id=392>(2013)
29. Kraftfahrtbundesamt.[http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/bestand\\_node.html](http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/bestand_node.html); und [http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/2013/2013\\_b\\_ueberblick\\_pdf.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/2013/2013_b_ueberblick_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=3). (2014)
30. Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt): Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung. Forschung kompakt 11/12. (2012)
31. Müller, J.; Schmöller, S.; Bogenberger, K.: Empirische Datenanalyse von Free Floating Car Sharing-Systemen, HEUREKA 2014, pp. 577–590. (2014)
32. Entwicklung des Carsharings in Deutschland: DriveNow und Car2Go haben die Nase vorn. <http://getmobility.de/20140816-drivenow-und-car2go-haben-die-nase-vorn/>; erstmals veröffentlicht am 16. August 2014; Zugriff am 4. September 2014. (2014)
33. Chlond, B.; Manz, W.: INVERMO – Das Mobilitätspanel für den Fernverkehr. Arbeitsbericht IfV-Report Nr.00-9, Institut für Verkehrswesen, Universität Karlsruhe. (2000)
34. CarsharingNews.de: MeinFernbus und DriveNow kooperieren. <http://www.carsharing-news.de/meinfernbus-drivenow-kooperation/> erstmals veröffentlicht am 6. Juni 2014; Zugriff am 4. September 2014. (2014)
35. Mein Fernbus und DriveNow kooperieren. <http://www.carsharing-news.de/meinfernbus-drivenow-kooperation/> vom 6. Juni 2014; Zugriff am 13.08.2014. (2014)
36. Spiegel Online: Älteste U-Bahn-Strecke von Paris: Métro-Linie 1 fährt ohne Zugführer. <http://www.spiegel.de/reise/aktuell/aelteste-u-bahnstrecke-von-paris-metro-linie-1-faehrt-ohne-zugfuehrer-a-795718.html>; erstmals veröffentlicht am 3. November 2011; Zugriff am 17. August 2014. (2011)
37. Youtube: Fahrt in der führerlosen U-Bahn in Nürnberg. <https://www.youtube.com/watch?v=uPPpIGesPTY>; erstmals veröffentlicht am 10. Dezember 2012; Zugriff am 4. September 2014. (2012)
38. Boostbybenz. <https://boostbybenz.com/>; Zugriff am 4. September 2014. (2014)

Sven A. Beiker

## Inhaltsverzeichnis

<b>10.1 Einleitung</b> .....	198
<b>10.2 Begriffsbestimmung und Abgrenzung</b> .....	198
<b>10.3 Entwicklungstrends im automatisierten Fahren</b> .....	199
10.3.1 Kontinuierliche Weiterentwicklung der Fahrerassistenz: evolutionäres Szenario .....	199
10.3.2 Umgestaltung der Individualmobilität: revolutionäres Szenario .....	202
10.3.3 Zusammenwachsen von Individualmobilität und öffentlichem Personentransport: transformatives Szenario .....	204
<b>10.4 Vergleichende Betrachtung der Szenarien</b> .....	206
10.4.1 Systemischer Vergleich .....	206
10.4.2 Technischer Vergleich .....	209
10.4.3 Regulatorischer Vergleich .....	210
10.4.4 Unternehmensstrategischer Vergleich .....	211
<b>10.5 Zusammenfassung und Ausblick</b> .....	213
<b>Literatur</b> .....	214

---

S. A. Beiker (✉)  
formerly Stanford University, Center for Automotive Research at Stanford, USA  
sven@svenbeiker.com

## 10.1 Einleitung

Nach wie vor gehören Verkehrsunfälle zum alltäglichen Straßenbild, und die Statistiken dokumentieren, dass es beispielsweise in den USA ca. 33.000 Todesopfer pro Jahr gibt [1]; in Deutschland sterben ca. 3300 Menschen pro Jahr im Straßenverkehr [2]. An dieser Stelle verspricht die Fahrzeugautomatisierung, d. h. die zunehmende Übergabe der Fahraufgabe vom Menschen an den Computer, eine deutliche Reduktion der Unfallzahlen und Unfallschwere. Darüber hinaus ermöglichen automatisierte Fahrzeuge auch eine bessere Koordination der individuell genutzten Fahrzeuge allgemein und damit eine effizientere, komfortablere und sicherere Individualmobilität.

Dabei hat die Forschung und Entwicklung an automatisierten Fernstraßen und Fahrzeugen bereits eine über 50-jährige Historie, und es stellt sich die Frage, inwieweit die Vision realistisch ist, dass der Mensch in naher Zukunft die Fahraufgabe vollständig an den Computer übergeben kann. Dazu sind derzeit verschiedene Entwicklungsrichtungen zu erkennen: Die etablierte Automobilindustrie arbeitet an der Weiterentwicklung sogenannter Fahrerassistenzsysteme hin zum automatisierten Fahren; automobilfremde Technologiefirmen in der IT-Branche begreifen das automatisierte Fahren als ein neues Geschäftsfeld für ihre Kernprodukte; Firmenneugründungen drängen mit Hochtechnologie in den Bereich der automatisierten Individualmobilität. Bei tieferer Betrachtung wird deutlich, dass die genannten Akteure unterschiedliche Stärken und Produktziele haben, letztlich aber doch von derselben Motivation getrieben sind, nämlich die Individualmobilität sicherer, effizienter und komfortabler zu gestalten. Der Vergleich dieser Entwicklungsrichtungen und deren Akteure soll Inhalt dieses Beitrags sein.

Der Vergleich dieser Entwicklungsrichtungen wird als Einführungsszenarien betrachtet, was eine Prognose dessen ist, wie sich die Einführung höhergradig automatisierter Fahrzeuge vollziehen könnte. Dabei handelt es sich vorwiegend um eine Extrapolation des öffentlich bekannten Entwicklungsstandes automatisierter Fahrzeuge, fortgedacht unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen aus Infrastruktur, Wirtschaft und Technik.

---

## 10.2 Begriffsbestimmung und Abgrenzung

Automatisierte Fahrzeuge oder, wie sie auch genannt werden, „autonome“, „fahrerlose“, „selbstfahrende“ Fahrzeuge, werden derzeit weitverbreitet in der Öffentlichkeit diskutiert, in Universitäten beforscht und in der Automobilindustrie entwickelt. In diesem Beitrag richtet sich der Blick auf Straßenfahrzeuge, mit einem besonderen Schwerpunkt auf Pkw und gegebenenfalls auch Lkw. Schienengebundene oder Luft- bzw. Wasserfahrzeuge werden nicht darunter verstanden.

Im Allgemeinen werden diese Fahrzeuge im öffentlichen Straßenverkehr betrieben, zur Diskussion von Synergieeffekten werden allerdings auch Fahrzeuge in abgeschlossenen Bereichen betrachtet, wie z. B. auf Firmengeländen oder auch in Freizeitparks und Fußgängerzonen. Im Unterschied zum Einsatz im öffentlichen Straßenverkehr sind Einsatz-

beispiele in diesen abgegrenzten bzw. halböffentlichen Bereichen von Interesse, da dort bereits einige wichtige Interaktionen automatisierter Fahrzeuge mit der Öffentlichkeit beobachtet werden können, was letztlich dem Einsatz im allgemeinen Straßenverkehr zugutekommen wird. Das wird im Detail später in den einzelnen Einsatzszenarien diskutiert werden.

Bezüglich der Begrifflichkeit zum automatisierten Fahren bzw. automatisierter Fahrzeuge wird in diesem Beitrag die Definition der SAE International J3016 [3] benutzt, d. h., es wird nach assistiert, teilautomatisiert, bedingt automatisiert, hochautomatisiert sowie vollautomatisiert unterschieden.

Für diesen Beitrag wird aufgrund des speziellen Betrachtungsschwerpunkts der Begriff des höhergradig automatisierten Fahrens eingeführt; dies umfasst das bedingt-, hoch- oder vollautomatisierte Fahren. Dieser Schwerpunkt wird gesetzt, da der Schritt über das teilautomatisierte Szenario hinaus, d. h. wenn der Fahrer das Fahrzeug bzw. das System nicht mehr laufend überwachen muss, zu einer grundsätzlichen Veränderung des Autofahrens führt. Diese besteht darin, dass der Fahrer während der Fahrt anderen Aufgaben als der eigentlichen Fahrzeugführung nachgehen kann, später sogar im Falle „fahrerloser“ Fahrzeuge gar nicht mehr erforderlich ist. Damit werden für die Individualmobilität auch vollkommen neue Betriebs- und Geschäftsmodelle möglich.

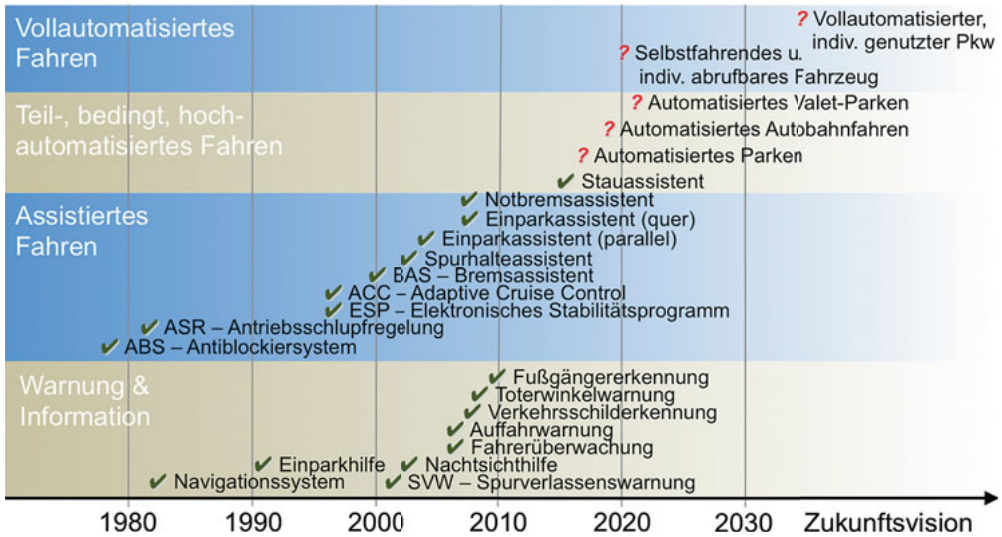
---

## 10.3 Entwicklungstrends im automatisierten Fahren

Die Beweggründe für die Einführung des automatisierten Fahrens – Sicherheit, Effizienz, erweiterte Mobilität, Komfort – lassen sich bei verschiedenen Entwicklungstrends auf diesem Gebiet beobachten. Dabei sind die einzelnen Aspekte unterschiedlich stark ausgeprägt und hängen deutlich vom verfolgten Einsatzgebiet und -zweck ab. Das wird in den folgenden Abschnitten anhand von derzeit zu beobachtenden Entwicklungstrends genauer ausgeführt. Dazu beschreiben die folgenden drei Unterabschnitte zunächst die Einführungsszenarien, welche die derzeitige Diskussion in der Fachwelt und auch der breiten Öffentlichkeit widerspiegeln.

### 10.3.1 Kontinuierliche Weiterentwicklung der Fahrerassistenz: evolutionäres Szenario

Einer der Hauptakteure des automatisierten Fahrens ist die Automobilindustrie mit ihren Fahrzeugherstellern und Systemlieferanten. Dabei handelt es sich um die Weiterentwicklung von Fahrerassistenzsystemen, d. h. von Konzepten, die den Fahrer bei der Fahrzeugführung unterstützen. In den vergangenen fast 40 Jahren haben sich derartige Systeme wie Anti-Blockier System (ABS), Electronic Stability Program (ESP), Adaptive Cruise Control (ACC) oder Spurhalteassistenten in Pkw und Lkw etabliert, die den Fahrer zunächst bei der Längs- und zunehmend auch bei der Querverführung des Fahrzeugs unterstützen.



**Abb. 10.1** Übersicht über die Einführung von Fahrerassistenzsystemen mit der Vision des vollautomatisierten Fahrens (Definition der Automatisierungsebenen nach SAE J3016 [3])

Abbildung 10.1 zeigt eine Übersicht über die Zeitpunkte der Einführung dieser Systeme, dabei standen bisher hauptsächlich der Sicherheitsgewinn und zum Teil die Komfortsteigerung im Vordergrund. Der zunehmende Einsatz von Fahrerassistenzsystemen und dann die schrittweise Fahrzeugautomatisierung mit entsprechend abnehmender Fahraufgabe für den Fahrer wird als evolutionäres Szenario bezeichnet und beschreibt eines der drei Einführungsszenarien, die in diesem Beitrag verglichen werden.

Derzeit ist die Automobilindustrie dabei, zum ersten Mal einen Systemverbund aus automatisierter Längs- (Antreiben, Bremsen) und Querführung (Lenken) mit Fahrerüberwachung in Serienfahrzeuge einzuführen, was damit ein teilautomatisiertes System beschreibt. Dieser Systemverbund, der oft als Stauassistent bezeichnet wird [4, 5, 6], ist ein gemeinsamer Regelansatz aus Abstandsregeltempomat (automatisierte Längsführung) und Spurhalteassistent (automatisierte Querführung), der das Fahrzeug im zähfließenden Verkehr automatisiert in Längs- und Querrichtung führt. Der Fahrer überwacht dabei lediglich das System, um im Bedarfsfall einzugreifen.

Als nächste Entwicklungsstufe wird eine zunehmende Automatisierung des Parkens erwartet. Bereits heute gibt es eine Vielzahl von Personenwagen, bei denen der Einparkvorgang erheblich erleichtert wird, und zwar sowohl das rechtwinklige als auch das parallele Einparken [7]. Allerdings wird hier i. A. nur die Lenkaufgabe, d.h. die für viele Fahrer schwierigere Aufgabe, vom System übernommen, während der Fahrer immer noch Antrieb und Bremse steuern muss. Damit fallen diese heutigen Systeme in die Kategorie des assistierten Fahrens. Für die nahe Zukunft sind zunehmend teilautomatisierte Konzepte für das Einparken zu erwarten, d.h. dass nach dem systemgesteuerten Lenken auch Antrieb und Bremsen automatisiert werden. Dem Fahrer wird dann nur noch die Aufgabe der System-

überwachung zukommen, indem beispielsweise eine Taste während des gesamten Einparkvorganges zu betätigen ist, womit die Aufmerksamkeit und Verantwortung des Fahrers signalisiert wird [8].

In der jüngeren Vergangenheit sind von verschiedenen Automobilherstellern Aussagen gemacht worden, die das Jahr 2020 als Ziel für das „autonome“ Fahren ankündigen [9, 10, 11]. Da der Begriff „autonom“ nicht in Übereinstimmung mit den Definitionen wie beispielsweise der SAE International oder anderen Organen verwendet wird, ist nicht mit Sicherheit zu sagen, welcher Automatisierungsgrad mit diesen Ankündigungen referenziert wird. Allerdings ist zu vermuten, dass die Funktionalität deutlich über die Teilautomatisierung hinausgeht und unter Umständen sogar bis in den Bereich der Hochautomatisierung vordringt. Das wäre dann ein Konzept, bei dem der Fahrer in speziell definierten Anwendungsfällen und -gebieten nicht einmal mehr im Notfall die Fahraufgabe übernehmen muss, vielmehr kann das System sämtliche Fahraufgaben einschließlich unvorhergesehener Situationen selbst ausführen.

Diese Ankündigungen, oft gepaart mit öffentlichen Konzeptvorstellungen höhergradig automatisierter Fahrzeuge, zeigen auch, dass derzeit viele namhafte Automobilhersteller und Systemlieferanten an Konzepten arbeiten, die die Evolution der Fahrerassistenz in Richtung des höhergradig automatisierten Fahrens vorantreiben [10, 12, 13]. Dabei werden die Fahrsicherheit entsprechend der eingangs beschriebenen Motivation für das automatisierte Fahren als oberstes Ziel und zusätzliche Effizienzsteigerung sowie Komfortgewinn als weiterer Nutzen angeführt.

Über das Zieldatum 2020 hinaus ist eine Vorhersage allerdings kaum möglich. Auch wenn einige Marktanalysten und auch mitunter Automobilfirmen die Vollautomatisierung für 2025 in Aussicht stellen [12], so ist dies doch eher als ein möglicher Meilenstein in der Evolution der Fahrerassistenz hin zum automatisierten Fahren zu sehen und sollte nicht als eine gesicherte Aussage verstanden werden, wann bestimmte Systemumfänge und Funktionen verfügbar sein werden. Derartige Projektionen sind wegen des recht langen Zeithorizonts mit Vorsicht zu genießen.

Bei einem evolutionären Einführungszenario kann angenommen werden, dass es relativ lange dauern würde, bis ein signifikanter Anteil der Fahrzeuge auf öffentlichen Straßen höhergradig automatisiert ist, selbst wenn diese Fahrzeuge ab 2020 als Serienfahrzeuge zum Verkauf stünden. So hat es in der Vergangenheit ca. 15–20 Jahre gedauert, bis ABS oder ESP in allen neuen Fahrzeugen serienmäßig oder zumindest als Extraausstattung verbaut wurden [14]. Da die Gesamtheit aller Fahrzeuge auf öffentlichen Straßen sich nur über einen Zeitraum von etwa 20 Jahren weitestgehend erneuert [15], ist davon auszugehen, dass unter der Annahme einer evolutionären Entwicklung in absehbarer Zukunft kaum zu erwarten ist, dass ein Großteil der Fahrzeuge ohne Fahrerinteraktion betrieben wird. Damit ist dieses Szenario ein langfristiger, aber vorhersehbarer Ansatz, besonders im Vergleich zum nachfolgend beschriebenen Szenario.

### 10.3.2 Umgestaltung der Individualmobilität: revolutionäres Szenario

Seit ca. 2010 ist bekannt, dass auch automobilfremde Technologiefirmen [16] an automatisierten Fahrzeugen arbeiten. Anders als bei dem zuvor diskutierten evolutionären Szenario, das die Automobilindustrie verfolgt, handelt es sich hier eher um ein revolutionäres Szenario, dessen erklärtes Ziel es ist, „Unfälle zu vermeiden, Zeit zu gewinnen und CO<sub>2</sub>-Emissionen zu reduzieren, indem die Fahrzeugnutzung fundamental verändert wird“ [16]. Aus entsprechenden Ankündigungen und öffentlichen Konzeptvorstellungen kann geschlossen werden, dass hier nicht die kontinuierliche Weiterentwicklung der Fahrerassistenz hin zum automatisierten Fahren verfolgt wird, sondern vielmehr der Sprung vom heutigen Verkehrsgeschehen mit fahrergeführten Fahrzeugen hin zu einem Szenario, bei dem der Fahrer die Fahraufgabe unmittelbar und vollständig an das System übergibt. Offenbar wird hier Bezug auf das vollautomatisierte oder zumindest hochautomatisierte Fahren genommen.

Besonderes Augenmerk verdient bei den Konzepten der automobilfremden Technologiefirmen der Einsatz sogenannter künstlicher Intelligenz, d. h., die Funktionalität des automatisierten Fahrens wird über lernende Algorithmen umgesetzt und weniger, wie in der Automobilindustrie üblich, durch geschlossene regelungstechnische Beschreibungen. Dadurch wird versucht, die Lücke zwischen einem rein analytischen System, das innerhalb enger Grenzen operiert, und einem regelbasierten System, welches das menschliche Verhalten nachbildet, zu schließen. Derartige lernende Systeme haben zum Ziel, über die Zeit ihre Funktionen, wie z. B. Objekterkennung, zu verbessern bzw. das Verhalten und die Präferenzen des Benutzers zu lernen. Solche Fahrzeugeigenschaften sind in der Automobilindustrie eher unüblich. Die klassische Vorgehensweise ist vielmehr, dass ein Produkt mit dem maximal möglichen Funktionsumfang eingeführt wird und darin unverändert bleibt. In der Computerbranche hingegen ist es üblich, Produkte einzuführen und deren Funktionsumfang, sei es durch Lernalgorithmen oder regelmäßige Softwareaktualisierung, dann stetig zunehmen zu lassen.

Während im vorherigen, evolutionären Szenario die Einführungsstrategien der Automobilindustrie relativ klar zu sein scheinen, ist das in dem nun betrachteten revolutionären Szenario nicht unbedingt gegeben. Vielmehr verfolgen die Akteure speziell in der Computer- und Kommunikationsindustrie (IT-Branche), bei denen es sich um automobilfremde Technologiefirmen handelt [17, 18, 19, 20, 21], ein hochkomplexes Ziel in einem für sie branchenfremden Gebiet, das nicht direkt zum Kerngeschäft passen mag. Obwohl in einem Fall offenkundig bereits mehrere hunderttausend Meilen im höhergradig automatisierten Betrieb absolviert wurden [22], ist es derzeit unklar, welche Produktziele letztlich verfolgt werden. Von den Akteuren dieses revolutionären Szenarios werden bisher kaum Angaben zu konkreten Markteinführungen gemacht, und es ist ungewiss, ob die automobilfremden Technologiefirmen sich als Fahrzeughersteller zu etablieren versuchen [23, 24]. Bisher wurden verschiedene Einsatztermine vermutet [25, 26], die in Verbindung mit anderen Beobachtungen auf diesem Gebiet zu den folgenden Einführungsszenarien führen.

Denkbar erscheint, dass die derzeit zu beobachtenden Versuchsfahrten von höhergradig automatisierten Fahrzeugen letztlich die Plattform für die Akquisition und spätere Anwendung von Karten- und Bildmaterial für die automatisierte Fahrzeugführung darstellen. Die automobilfremden Technologiefirmen könnten dann Dienstleistungen und Online-Softwareprodukte als Bestandteil einer automatisierten Fahrzeugführung anbieten und damit die Fahrzeugautomatisierung auf breiter Front vorantreiben. Damit könnten dann entsprechende Karten- und Grafikinformatoren für eine breite Anwendung zur Verfügung stehen, was eher eine kontinuierliche und weniger revolutionäre Einführung der Automatisierung wäre.

Dennoch könnte am Ende das Ziel darin bestehen, dass der Fahrer, sobald das Fahrzeug die Fahraufgabe selbsttätig und ohne Überwachungsbedarf ausführt, die Angebote aus dem Kerngeschäft dieser automobilfremden Technologiefirmen, d. h. Internetdienste, konsumiert. Der Ansatz dieser Akteure bestünde damit in einer recht langfristigen und auf den Umsatz im Kerngeschäft ausgerichteten Strategie, die versucht, die letzten noch unbesetzten Marktanteile – also den Mobilitätssektor – für das vernetzte Leben zu erschließen. Das würde bedeuten, dass der Fahrer während der Fahrt im Internet surft oder in sozialen Netzwerken aktiv ist und dabei genauso ein potenzieller Kunde von Internetdiensten ist, wie jeder andere Computernutzer auch.

Ein anderes Einführungsszenario, das besser zum Charakter der Branche zu passen scheint und auch eher eine revolutionäre Ausprägung offenbart, lässt sich aus öffentlichen Konzeptvorstellungen [24], Pressemitteilungen [22] und auch Patenten [27] der Branche ableiten. Demnach erscheint eine Einführung von höhergradig (und unter Umständen sogar voll-)automatisierten Fahrzeugen für Mobilitätsdienstleistungen wie Personen- [28, 29, 30] und Warentransport [31] möglich, und das sogar relativ zeitnah. Beispielsweise wäre denkbar, dass höhergradig automatisierte Fahrzeuge im Wettbewerb zum klassischen Taxi angeboten werden. Entsprechende Presseveröffentlichungen [22] und Medienberichte [24] scheinen ein derartiges Einführungsszenario zu favorisieren, wobei diesen Mitteilungen letztlich aber nur wenig über die wahren Ziele sowie den Entwicklungsstand der technischen Umsetzung zu entnehmen ist. Dieser Anwendungsfall entspräche dabei dem in diesem Buch als „Vehicle-on Demand“ bezeichneten Use-Case.

Eine Abwandlung des automatisierten Taxis sind auch die höhergradig automatisierten Zustelldienste, wie beispielsweise die Essenslieferung [32, 33, 34], die Hauslieferung des örtlichen Einzelhandels [31] oder auch generell die Zustellung jeglicher im Internet bestellter Waren [18]. Für derartige Beispiele sind bereits öffentlich Konzeptvorstellungen gezeigt worden. Strategische Investitionen bzw. Akquisitionen der treibenden Unternehmen legen die Vermutung nahe, dass eine zunehmende Automatisierung der Warenzustellung eine mögliche Anwendung der Fahrzeugautomatisierung ist. Ebenso mögen Tests von sogenannten Drohnen zum Ausliefern von Waren [18, 32, 33] oder auch eine automatisierte Müllentsorgung [35] in diese Richtung weisen (s. Kap. 18).

Auch wenn noch viele Fragen unbeantwortet erscheinen, könnte bereits in dieser Dekade ein großer Schritt in Richtung höhergradiger Fahrzeugautomatisierung erfolgen, der unter Umständen zu Beginn als klein und sehr begrenzt erscheinen mag (z. B. vollautoma-



tisierte Taxis nur in einem Stadtteil), dessen Umsetzung sich dann allerdings schnell räumlich ausbreitet und an Marktanteil gewinnt. Ankündigungen der treibenden Firmen stützen die Vermutung, dass die Einführung höhergradig automatisierter Fahrzeuge noch vor 2020 erfolgt [22].

Mit solch einer zunächst begrenzten Einführung hätten die automobilfremden Technologiefirmen die Möglichkeit, schon bald viel Erfahrung und Datenmaterial zu sammeln, auch was die öffentliche Reaktion betrifft, und dies dann für einen zügigen Ausbau auf regionaler, nationaler und letztlich globaler Ebene zu nutzen. Eine derartige Einführungsstrategie wäre für die etablierte Automobilindustrie eher ungewöhnlich und unter Umständen imageschädigend. Für die nichtautomobilen Technologiefirmen dagegen ist eine solche Vorgehensweise üblich. Sie hat in der Vergangenheit bei anderen Produkten durchaus zu einem positiven Image beigetragen, da eine begrenzte Einführung eine gewisse Exklusivität mit sich bringt [36, 37].

### **10.3.3 Zusammenwachsen von Individualmobilität und öffentlichem Personentransport: transformatives Szenario**

Ein weiteres Einführungsszenario für das automatisierte Fahren besteht in der Implementierung von Mobilitätslösungen, die beispielsweise im innerstädtischen Bereich langsam fahrende Fahrzeuge zur Personenbeförderung anbieten. Derartige Fahrzeuge könnten vom Verbraucher per Smartphone-App angefordert und für eine vergleichsweise kurze Strecke genutzt werden (s. Use-Case „Vehicle-on-Demand“ Kap. 2). Die Treiber derartiger Konzepte sind oft Firmenneugründungen im Hochtechnologiesektor, aber auch Mobilitätsdienstleister, Gemeinden oder Betreiber von Vergnügungsparks oder Ähnlichem. Ziel ist es hier, die Vorteile von Individualmobilität (Unabhängigkeit und Flexibilität) mit denen des öffentlichen Personentransports (Energieeffizienz und Raumökonomie) zu kombinieren und damit entsprechend der eingangs beschriebenen Motivation für das automatisierte Fahren vorrangig Vermeidung von Staus im innerstädtischen Bereich zu erreichen (s. Kap. 9).

Die Beweggründe für die Firmenneugründungen, sich in derartigen Bereichen zu betätigen, liegen in der Entwicklung neuer Geschäftsmodelle und dem Einsatz neuer Technologien. Dabei bietet besonders der Einsatz der mittlerweile als modulare Komponenten weitverbreitet verfügbaren Systeme in der Bildverarbeitung, Objekterkennung und Routenplanung auch fachfremden Firmen Möglichkeiten, höhergradig automatisierte Mobilitätskonzepte mit begrenztem Einsatzgebiet umzusetzen. Die verfolgten Konzepte für eine Markteinführung sind häufig Angebote für die sogenannte „erste bzw. letzte Meile“, d. h. langsam fahrende und gebietsbeschränkte Fahrzeuge, die das privat genutzte Automobil oder den öffentlichen Personentransport komplementieren. Konkrete Anwendungsbeispiele sind die Erweiterung der Angebote von Bussen und Stadtbahnen, wo ein fahrplanmäßiger Betrieb aus infrastrukturellen oder finanziellen Gründen nicht möglich ist, oder Shuttle-Dienste im Anschluss an eine Autofahrt, die beispielsweise auf einem Parkplatz am Stadt-

rand oder bei einem Vergnügungspark endet und dann mit einem lokalen Mobilitätsdienstleister fortgesetzt wird. Damit kommen solche Konzepte vorrangig dort zum Einsatz, wo ein individuell genutzter Pkw nicht praktikabel oder zulässig ist oder der auf einen bestimmten Fahrplan festgelegte Bus nicht flexibel genug ist.

Diese Mobilitätsangebote stehen im Wettbewerb zum klassischen Taxi, jedoch stellen sie sowohl für den Verbraucher als auch den Betreiber eine kostengünstigere, komfortable und innovative Mobilitätslösung dar [38]. Aufgrund ihrer Eigenschaften werden diese Konzepte englischsprachig auch Automated Mobility On-Demand (AMOD) genannt. Sie stellen eine Individualisierung des öffentlichen Personentransports dar, mit dem Ziel, den innerstädtischen Verkehr zu transformieren (s. Kap. 9; Kap. 11). Der Anreiz, solche Konzepte einzuführen, besteht für die treibenden Unternehmen darin, neue Geschäftsfelder zu erschließen bzw. bestehende zu erweitern. Im Vergleich zum bestehenden Taximodell ist zu beachten, dass der Taxibranche bisher ein vergleichsweise lohnkostenintensives Geschäftsmodell zugrunde liegt. Aufgrund des reduzierten Personaleinsatzes durch automatisierte Fahrzeuge wird nun eine Gewinnsteigerung erwartet [38], die allerdings auch von Personalabbau in dem entsprechenden Bereich begleitet wäre.

Es erscheint durchaus denkbar, dass automatisierte Fahrzeuge durch die Verknüpfung von Individualmobilität und öffentlichem Personentransport zu einer Transformation des Straßenverkehrs in Städten führen. Aufgrund des von vorneherein begrenzten Einsatzgebiets und der geringen Fahrgeschwindigkeit ergeben sich gegenüber den beiden ersten hier diskutierten Szenarien viele Vereinfachungen, die eine baldige und vergleichsweise einfache Implementierung erwarten lassen. So erscheint es realistisch, dass bis 2020 verschiedene Einsätze von AMOD in begrenztem Umfang erfolgen werden.

Derzeit gibt es für das transformative Szenario erste Umsetzungen oder sind in absehbarer Zeit geplant [24, 39, 40, 41, 42, 43]. Es ist zu erkennen, dass in verschiedenen Städten für die entsprechenden Einsatzfälle Betriebsbedingungen vorliegen, die zumindest zunächst einen versuchsweisen Betrieb für AMOD-Systeme ermöglichen. Dabei wird abzuwarten sein, inwieweit Nutzer das Angebot annehmen und es zu einem profitablen Geschäftsmodell kommt. Auch wenn die ersten Umsetzungen eher als erweiterter Versuchsbetrieb zwischen einer öffentlichen Konzeptvorstellung und einer tatsächlichen kommerziellen Anwendung zu sehen sind, sind diese Umsetzungen bislang der deutlichste Schritt in Richtung eines Einsatzes höhergradig automatisierter Fahrzeuge. Die beiden anderen (evolutionären und revolutionären) Szenarien können daraus Erfahrungswerte sowie Umsetzungspraktiken übernehmen.

Aufgrund grundsätzlich recht positiver Rahmenbedingungen ist zu erwarten, dass verschiedene Stadtverwaltungen und Betreiber von Freizeitparks, Einkaufszentren oder sonstigen Großeinrichtungen automatisierte Transportsysteme kurzfristig und punktuell einführen werden. Damit erscheint es auch als sehr wahrscheinlich, dass durch entsprechende Umsetzungsbeispiele bis zum Ende dieser Dekade bereits recht vielfältige Erfahrungen bezüglich der Akzeptanz durch Benutzer und andere Verkehrsteilnehmer vorliegen werden. Dabei kann trotz der Vereinfachungen angesichts des eingeschränkten Einsatzgebiets und der geringen Fahrgeschwindigkeit auch für das von der Automobilindustrie verfolgte evo-

lutionäre Einführungsszenario automatisierte Fahrzeuge auf öffentlichen Stadt- und Fernstraßen gelernt werden. So kann beispielsweise schon aus dem begrenzten Einsatzfall der Hoch- bzw. Vollautomatisierung mit den AMOD viel bezüglich der Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern (sowohl konventionelle Fahrzeuge als auch Fußgänger und Radfahrer) oder auch hinsichtlich der Sicherheitskonzepte sowie Infrastrukturanforderungen für einen späteren Betrieb auf öffentlichen Straßen abgeleitet werden. Außerdem kann angenommen werden, dass der zu Beginn gegebenenfalls begrenzte Einsatzbereich von AMOD mit der Zeit ausgeweitet wird, d. h. dass ein automatisiertes Mobilitätskonzept nach und nach auf den öffentlichen Straßenverkehr ausgeweitet wird und dann dort auf konventionelle bzw. automatisierte Pkw trifft.

## 10.4 Vergleichende Betrachtung der Szenarien

Nachdem die Einführungsszenarien im vorherigen Abschnitt einzeln vorgestellt worden sind, erfolgt im Folgenden eine vergleichende Betrachtung auf verschiedenen Ebenen. Wie zuvor gezeigt wurde, haben diese Szenarien sowohl unterschiedliche als auch gemeinsame Zielsetzungen bezüglich des Nutzens für den Verbraucher, der treibenden Unternehmen und auch des Verkehrs als Ganzem. Ziel des folgenden Abschnitts ist es nun, Unterschiede deutlicher herausstellen, aber auch Gemeinsamkeiten zu erschließen.

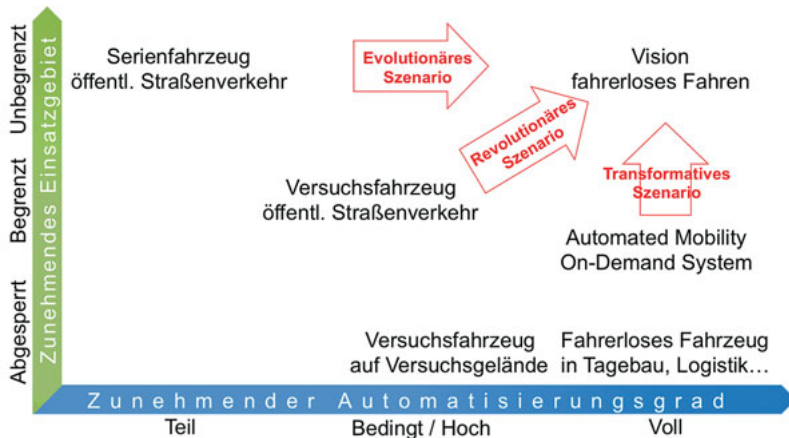
### 10.4.1 Systemischer Vergleich

Für den systemischen Vergleich der in Tab. 10.1 zusammengefassten drei Einführungsszenarien soll eine Gesamtbetrachtung des Anwendungsfalls für das höhergradig automatisierte Fahren angestellt werden, d. h., Zielsetzungen, Umsetzungsmöglichkeiten sowie Betriebsmodelle der einzelnen Szenarien sollen gegenübergestellt werden.

Wie eingangs ausgeführt wurde, verfolgen alle drei Szenarien das Ziel, die Sicherheit und Effizienz im Straßenverkehr zu erhöhen sowie Mobilität und Komfort zu steigern.

**Tab. 10.1** Charakteristiken der betrachteten Einführungsszenarien

	Evolution	Revolution	Transformation
<b>Automatisierung</b>	teil/bedingt	bedingt/hoch/voll	hoch/voll
<b>Gebietsbegrenzung</b>	keine	regional	lokal
<b>Betrieb</b>	Laien	Fachpersonal u./o. Laien	Fachpersonal
<b>Nutzung</b>	individuell/ privat	individuell/ privat oder öffentlich	individuell/ öffentlich
<b>Eigentümerschaft</b>	individuell/ privat	zentral/ kommerziell	zentral/ kommerziell



**Abb. 10.2** Einsatzmöglichkeiten für das automatisierte Fahren nach Automatisierungsgrad und Einsatzgebiet

Dabei erfolgt eine zunehmende Spezialisierung für die Verwendung eines Fahrzeugs oder auch Assistenzsystems. So wird beispielsweise für Pkw das höhergradig automatisierte Fahren zu Beginn nur auf Schnellstraßen und Autobahnen oder beim Parken, also für spezielle Fahrsituationen, angeboten; neue Mobilitätskonzepte werden zunächst nur in begrenzten Gebieten wie z. B. Einkaufszentren oder Freizeitparks (speziellen Einsatzgebieten also) eingesetzt. Damit würde sich eine deutlichere Spezialisierung des Fahrens bzw. von Systemfunktionen ergeben, als es bisher der Fall ist. Bislang ist es üblich, dass ein individuell genutzter Pkw der Erwartung „jedermann, immer, überall“ gerecht wird. Oder mit anderen Worten: Sofern die entsprechende Erlaubnis gegeben ist, kann jedermann einen Pkw benutzen, und das zu jeder Zeit und an jedem Ort. Mit dem höhergradig automatisierten Fahren mag sich dem Nutzer ein Szenario eröffnen, bei dem die Benutzung mehr eingeschränkt oder auch anwendungsspezifischer ist, was ein entsprechendes Umdenken erfordert.

Diese Einschränkungen werden in Abb. 10.2 deutlich, die Automatisierungsgrad und Einsatzgebiet gegenüberstellt. Diese beiden Komponenten stellen die vielleicht wichtigsten Klassifizierungsmerkmale für das automatisierte Fahren dar und ermöglichen einen guten Vergleich der drei hier vorgestellten Einführungsszenarien. Das evolutionäre Szenario, die kontinuierliche Weiterentwicklung der Fahrerassistenzsysteme, ist auf ein unbegrenzt Einsatzgebiet ausgerichtet, wie beispielsweise „alle Schnellstraßen und Autobahnen“ oder „jede Parklücke“. Es bietet allerdings zunächst nur eine vergleichsweise niedrige Automatisierung. Dagegen implizieren das revolutionäre, auf die Umgestaltung der Individualmobilität abzielende Szenario, sowie das transformative, das Zusammenwachsen von Individualmobilität und öffentlichem Personentransport begünstigende Szenario, einen sehr hohen Automatisierungsgrad. In beiden Fällen ist eine rasche Entwicklung hin zu einem vollautomatisierten Szenario denkbar, jedoch in einem begrenzten Einsatzgebiet, wie beispielsweise in einem bestimmten Stadtteil oder im Umfeld eines Einkaufszentrums

oder Freizeitparks. Damit kann vereinfachend gesagt werden, dass sich das evolutionäre Szenario dem Ziel der Vollautomatisierung mit einem Ansatz „unbegrenzt Einsatzgebiet und begrenzte Automatisierung“ nähert, das revolutionäre und transformative Szenario dagegen mit einem Ansatz „begrenzt Einsatzgebiet und unbegrenzte Automatisierung“.

Besonders interessant ist beim Vergleich in Abb. 10.2, dass sich das revolutionäre Szenario auf keiner der beiden Achsen im Vergleich zu dem evolutionären bzw. transformativen Szenario heraushebt, aber in der Gesamtsicht dem Zielszenario eines vollautomatisierten und unbegrenzt zu nutzenden Fahrzeugs am nächsten kommt. Damit scheint dieses Szenario dem „jedermann, immer, überall“ durch die Kombination eines vergleichsweise großen Einsatzgebiets mit vergleichsweise hoher Automatisierung am ehesten zu entsprechen.

Für das transformative Szenario ist besonders zu betrachten, durch wen die Fahrzeuge betrieben werden. Zu erwarten ist, dass geschultes Fachpersonal den Betrieb der Fahrzeuge überwacht oder zumindest eine regelmäßige, z. B. tägliche, technische Überprüfung vornimmt. Das Szenario ist damit deutlich vom Betrieb individuell genutzter Pkw zu unterscheiden, bei denen abgesehen von einer gelegentlichen Wartung kein Fachpersonal in den Betrieb involviert ist, sondern als technische Laien zu betrachtende Personen die Fahrzeuge betreiben. Dadurch stellt der Anwendungsfall „jedermann, immer, überall“ für das evolutionäre Szenario eine ganz besondere Herausforderung dar, weil eine extrem hohe Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit auch ohne eine kontinuierliche Fachbetreuung zu gewährleisten sind. Dessen ungeachtet erweisen sich die revolutionären und transformativen Szenarien bei der Vorbereitung höhergradig automatisierter und individuell genutzter Pkw als hilfreich, da sich unter Aufsicht durch Fachpersonal schon frühzeitig Erfahrungswerte aus dem Betrieb dieser Fahrzeuge ableiten lassen.

Ein möglicher Anwendungsfall für höhergradig automatisierte Fahrzeuge, der sich nicht direkt in die genannten drei Entwicklungsszenarien eingliedern lässt, dem aber doch eine besondere Bedeutung zukommt, ist ein automatisierter Konvoi auf Schnellstraßen oder Autobahnen. Bei diesem Anwendungsfall werden mehrere ansonsten individuell genutzte Fahrzeuge durch eine gemeinsame Kommunikationsinfrastruktur zu einem virtuellen Gespann zusammengekoppelt. So kann dann die Längs- und Querverführung automatisiert werden, allerdings ist dazu auch ein besonderer Kommunikationsstandard erforderlich und nur damit kompatible Fahrzeuge können eingebunden werden. Das erste Fahrzeug in solch einem Konvoi wird – zumindest vorläufig – von einem professionellen Fahrer geführt werden, alle nachfolgenden Fahrzeuge benötigen dagegen keine dauernde Überwachung und greifen nur in Ausnahmesituationen auf den Fahrer zurück [44].

Das Szenario für den automatisierten Fahrzeugkonvoi vereint verschiedene Eigenarten der evolutionären und transformativen Szenarien, die es auch realistisch erscheinen lassen, derartige Konzepte zeitnaher im allgemeinen Straßenverkehr umzusetzen. Damit können auf der einen Seite bereits frühzeitig Szenarien mit höhergradig automatisierten Fahrzeugen realisiert werden, da die gegebenenfalls eingeschränkten Objekt- und Situationserkennungsfähigkeiten automatisierter Systeme durch die Leistungsfähigkeit und Erfahrung des Fahrers im Führungsfahrzeug komplementiert werden können. Auf der anderen

Seite können aber auch zusätzliche Problemstellungen auftreten, wie beispielsweise das Ein-/Ausscheren aus dem Konvoi, das Überholen durch andere Fahrzeuge oder aber auch die Einhaltung des gesetzlichen Mindestabstandes.

### 10.4.2 Technischer Vergleich

Aus dem systemischen Vergleich wurden bereits einige Unterschiede zwischen den Einführungsszenarien deutlich, die auch unterschiedliche Anforderungen an die Zuverlässigkeit oder genauer gesagt an die Vollständigkeit und Verfügbarkeit der erforderlichen Technologie betrachten. Da im Falle des evolutionären Szenarios der individuell genutzte Pkw ohne zeitliche oder räumliche Einschränkung für jedermann verfügbar funktionieren muss, ergeben sich daraus andere technische Anforderungen als wenn beispielsweise im transformativen Szenario ein vollautomatisiertes Fahrzeug nur in einem eng begrenzten Bereich und von Betriebspersonal überwacht betrieben wird. Außerdem mögen die Stückzahlen der betrachteten Fahrzeuge und damit Systemkomponenten sehr unterschiedlich sein, was einen Einfluss auf die zum Einsatz kommende Technologie haben kann.

Damit kann verallgemeinernd für das evolutionäre Szenario festgestellt werden, dass hier hochgradig ausfallsichere (d. h. redundant und mit Rückfallebenen versehene), wartungsarme (d. h. selbstkalibrierende und selbstüberwachende) und kostengünstige (d. h. massenproduzierte) Komponenten als Sensoren und Prozessoren zum Einsatz kommen, die ein Höchstmaß an Verfügbarkeit ermöglichen (s. Tab. 10.2). Für das transformative Szenario dagegen sind hochgenaue und individuell konfigurierbare Spezialsysteme von Vorteil, die ein Höchstmaß an Automatisierung schon zu einem frühen Einsatzzeitpunkt, wenn auch mit höherem Infrastrukturaufwand, erlauben. Der spezielle Infrastrukturaufwand für das transformative Szenario liegt in einem Kommunikationssystem, das einen koordinierten und sicheren Betrieb vollautomatisierter Fahrzeuge erlaubt oder auch den Einsatz von Wartungs- und Überwachungspersonal erfordert, das die Funktionssicherheit der Fahrzeuge durch regelmäßige und bedarfsgerechte Wartung gewährleistet.

**Tab. 10.2** Qualitativer Vergleich der Systemanforderungen für die drei betrachteten Einführungsszenarien

	Evolution	Revolution	Transformation
<b>Ausfallsicherheit</b>	++	++	+
<b>Präzision</b>	+	++	++
<b>Konfigurierbarkeit</b>	0	+	++
<b>Wartungsaufwand</b>	–	+	++
<b>Fernüberwachung</b>	--	+	++
<b>Systemkosten</b>	–	+	++

++ (hoch), + (signifikant), 0 (neutral), – (gering), -- (nicht zutreffend)

Die Anforderungen für das revolutionäre Einsatzszenario, bei dem der Einsatz von automatisierten Fahrzeugen funktional und räumlich begrenzt erfolgt, sind zwischen den technischen Anforderungen des evolutionären und des transformativen Szenarios anzusiedeln, da hier von einer zentral betriebenen und professionell gewarteten Fahrzeugflotte ausgegangen wird, die aber nicht notwendigerweise dauerhaft überwacht wird. Damit sind hochgradig ausfallsichere und hochgenaue Systeme erforderlich, die vermutlich mit recht hohen Kosten verbunden sind.

Bei den Einführungsszenarien kommt dem Einsatz einer Kommunikationsinfrastruktur für höhergradig automatisierte Fahrzeuge eine besondere Bedeutung zu. So können beispielsweise durch Fahrzeug-Fahrzeug- bzw. Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation weitere Daten wie Fahrzeugpositionen, Fahrgeschwindigkeiten und andere Parameter ausgetauscht und somit für die Streckenführung oder auch für eine zentrale Fahrzeugkoordination verwendet werden. Derzeit scheint sich in Industrie und Forschung ein Trend abzuzeichnen, dass bei zunehmender Automatisierung auch eine zunehmende Vernetzung von Fahrzeugen gefordert wird. In dem Zusammenhang ist auch von besonderer Bedeutung, dass die Gesetzgebung in verschiedenen Ländern den Ausbau von Fahrzeug-Fahrzeug- bzw. Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation vorantreiben will [45, 46, 47, 48].

### 10.4.3 Regulatorischer Vergleich

Die drei Szenarien lassen sich auch durch die zur Anwendung kommende Rechtsprechung unterscheiden. Da für das evolutionäre Szenario gelten soll, dass diese Fahrzeuge im öffentlichen Straßenverkehr betrieben werden und keiner räumlichen oder zeitlichen Einschränkung unterliegen sollen, muss dies im Einklang mit der entsprechend geltenden Straßenverkehrsordnung erfolgen. Dies hat zur Folge, dass derzeit nicht *a priori* geklärt ist, in welchen Rechtsgebieten und zu welchem Grad automatisierte Fahrzeuge im öffentlichen Straßenverkehr betrieben werden dürfen.

Für das transformative Szenario gelten dagegen andere Verhältnisse. Besonders aufgrund des hier angenommenen räumlich begrenzten Einsatzes, zunächst vermutlich nicht auf öffentlichen Straßen und auch nicht in sonstigen uneingeschränkt zugänglichen Bereichen (sondern beispielsweise nur in Einkaufszentren oder Vergnügungsparks mit gesonderter Zugangsregelung), kann auch gegebenenfalls eine Sondergesetzgebung implementiert werden. Das bedeutet, dass für das entsprechende Gebiet, in dem die automatisierten Fahrzeuge betrieben werden, besondere Regeln erstellt werden, nur eine bestimmte Personengruppe Zugang hat oder alle anwesenden Personen ihr Einverständnis geben. Insbesondere das Letztere würde den Betrieb erheblich erleichtern, da beispielweise die Betriebshaftung oder auch Aufsichtspflicht bedarfspezifisch geregelt werden könnten.

Das revolutionäre Szenario ist zwischen dem evolutionären und transformativen anzusiedeln. Wenn angenommen wird, dass derartige Konzepte zunächst regional begrenzt sind, beispielsweise auf einen Stadtteil oder eine bestimmte Fernstraßenroute, so würde dort zwar die generelle Straßenverkehrsordnung gelten, allerdings wären Sonderregelungen

denkbar, beispielsweise dass spezielle Einschränkungen, Erlaubnisse oder Haftungsmechanismen nur für einen bestimmten Streckenabschnitt oder ein bestimmtes Gebiet gelten.

In Zusammenhang mit der jeweiligen Rechtsprechung ist es auch wichtig zu berücksichtigen, wie sich die Gesetzgeber in ihren entsprechenden Einflussbereichen der Fahrzeugautomatisierung annehmen. So wurden in den USA beispielsweise in einigen Bundesstaaten Gesetzesrahmen vorgegeben (die Vorreiter sind Nevada, Florida und Kalifornien), die den Betrieb höhergradig automatisierter Fahrzeuge regeln, wenn auch oft zunächst nur für den Versuchsbetrieb. Auf Bundesebene hat dagegen die National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) Zurückhaltung signalisiert und eine koordinierte Einführung gemeinsam mit der Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation vorgeschlagen [49]. In Japan hat die Regierung die Automatisierung des Straßenverkehrs als strategisches Ziel ausgemerkt und der Industrie damit Unterstützung zur Seite gestellt [50, 51]. In Europa verhalten sich die Regierungen bezüglich der Automatisierung – abgesehen von der kontinuierlichen Beteiligung an Forschungsprojekten [44, 47, 48, 52, 53, 54] – noch zurückhaltend, jedoch wird auch hier eine Intensivierung des Themas für die zweite Hälfte der Dekade 2010–2020 erwartet, was auch bereits in ersten Gesetzesvorstößen [55] sichtbar wird (s. Kap. 25).

#### 10.4.4 Unternehmensstrategischer Vergleich

In der Vorstellung der Einführungsszenarien wurden bereits die treibenden Akteure bzw. Unternehmenskategorien für die drei Fälle benannt. Das evolutionäre Szenario scheint eher von den etablierten Automobilherstellern und Systemzulieferern verfolgt zu werden, das revolutionäre von automobilfremden Technologiefirmen der Computer- und Kommunikationsbranche und das transformative von Firmenneugründungen sowie Dienstleistern.

Mit der Kategorisierung sind Unternehmenseigenarten, -zielsetzungen und -strategien verbunden, die in Tab. 10.3 gegenübergestellt sind. So können die etablierten Unternehmen der Automobilbranche auf Erfahrungen sowie Prozesse zurückgreifen, die es erlauben, Entwicklungsprojekte zum automatisierten Fahren mit entsprechender Planungssicherheit bis zur Markteinführung umzusetzen. Darin ist auch hauptsächlich der evolutionäre Ansatz verwurzelt, d. h. dass der bestehende Entwicklungs-, Produktions- und Vertriebsprozess auf die neue Produktausrichtung (das automatisierte Fahren) angewandt wird. Damit lassen sich nur recht schwer vollkommen neue Produkte oder Prozesse umsetzen. Der Automobilindustrie ist es auch eigen, dass die bestehende Marktposition bzw. Unternehmenshistorie mitunter zu einem für Außenstehende als zurückhaltend wahrgenommenen Vorgehen führt.

Die Ursache für die Zurückhaltung der Automobilindustrie mag auch darin zu sehen sein, dass der Ruf der Unternehmen, also das Markenimage beim Kunden, über Jahrzehnte aufgebaut und geschärft worden ist und einen sehr schützenswerten Faktor darstellt (s. Kap. 32). Der Ruf kann durch unzuverlässige oder gar unsichere Produkte schnell und nachhaltig gefährdet werden und sich langfristig auf den Geschäftserfolg eines Unternehmens auswirken. Dieses Risiko wird gerade bei einer vorschnellen Einführung automatisierter Fahrzeuge gesehen. Dass derartige Bedenken durchaus ihre Berechtigung haben,



**Tab. 10.3** Übersicht über verschiedene unternehmensstrategische Eigenarten bezüglich der Einführungsszenarien

	Evolution	Revolution	Transformation
<b>Haupttreiber</b>	Automobilindustrie (Hersteller, Zulieferer)	automobilfremde Technologiefirmen	Firmenneugründungen in Hochtechnologie
<b>Zielsetzung</b>	Festigung der Marktposition, Steigerung v. Sicherheit & Komfort	Erkundung neuer Geschäftsmodelle, Erweiterung Kerngeschäft	Schaffung neuer Dienstleistung für Stadtmobilität
<b>Kompetenz, Eigenarten</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Versuch, Absicherung</li> <li>• Produktion</li> <li>• Vertrieb</li> <li>• Marketing / Verkauf</li> <li>• Betrieb</li> <li>• Instandhaltung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• künstliche Intelligenz</li> <li>• digitale Karten</li> <li>• öffentlicher Versuch</li> <li>• unkonventionelle Produkte</li> <li>• Online-Dienste</li> <li>• neue Geschäftsmodelle</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bildverarbeitung</li> <li>• Sensortechnologie</li> <li>• neue Produkte und Geschäftsmodelle</li> <li>• schlanke, unkonventionelle Prozesse</li> </ul>

ist immer wieder an Beispielen zu erkennen, wenn Fahrzeugprodukte nicht die Kundenerwartungen erfüllen oder sogar ein Sicherheitsrisiko vermutet wird und die Verbraucher dann negativ auf die entsprechende Marke reagieren [56, 57, 58, 59]. Derartige Bedenken, ob begründet oder nicht, könnten zur verzögerten Markteinführung der hier betrachteten hochgradig sicherheitsrelevanten und im Mittelpunkt des öffentlichen Interesses stehenden Technologie des automatisierten Fahrens führen.

Derlei Mechanismen sind für Firmenneugründungen, die das transformative Szenario verfolgen, eher fremd, da die betrachteten Firmen i. A. keine lange Geschichte und kein (Automobil-)Markenimage haben. Außerdem können sie kaum auf eine langjährige Erfahrung bei Entwicklung, Produktion und Vertrieb von Automobilen zurückgreifen. Dadurch sind diese Firmen eher in der Lage, weitestgehend neue Produkte und Dienstleistungen zu entwickeln und anzubieten, wie es das betrachtete transformative Szenario erfordert. Diese Firmen gehen kaum das Risiko ein, dass der langwierig entwickelte Unternehmensruf beim Verbraucher geschädigt wird, wenn ein Produkt nicht die Erwartungen am Markt erfüllt.

Außerdem sind Firmenneugründungen oftmals in der Lage bzw. fast gezwungen, aufgrund der häufig kleinen Unternehmensgröße alternative und damit durchaus innovative Prozesse und Produktlösungen zu entwickeln. Aus diesen Gründen können die Firmenneugründungen entsprechende Konzepte zum automatisierten Fahren flexibler gestalten und gegebenenfalls eine risikoreichere Umsetzung verfolgen. Allerdings unterliegen die Firmenneugründungen der Herausforderung, dass die Entwicklung automatisierter Fahrzeuge aufgrund der Systemkomplexität und des Komponenteneinsatzes oftmals nur mittels hohen Kapitaleinsatzes zu realisieren ist, und dies mit einer vergleichsweise langen Vorlaufzeit, bis ein fertiges Produkt überhaupt einen Verkaufserlös erzielen kann. Deswegen sind diese Firmen häufig auf Risikokapitalgeber angewiesen und der Fortbestand der Unternehmen kann bisweilen unklar sein.

Auch hier liegt das revolutionäre Szenario wieder zwischen den beiden anderen. Wie zuvor ausgeführt, sind die Akteure hier häufig automobilfremde Technologiefirmen, die auf der einen Seite oft über ausreichendes Kapital verfügen und auf der anderen Seite auch neue Prozesse in die Automobilentwicklung einbringen können. Aus diesen Gründen erscheint es plausibel, dass gerade aus diesem Segment ein revolutionäres Szenario erwartet werden kann. Mittlerweile paart sich mit dieser Konstellation auch zunehmende Erfahrung mit Mobilitätssystemen, so wie eines der betrachteten Unternehmen der Computer- und Kommunikationsindustrie nach eigenen Angaben bereits über eine Million Kilometer mit höhergradig automatisierten Fahrzeugen zurückgelegt hat [22] und auch in den Personen- [28] sowie Warentransport [31] involviert ist.

---

## 10.5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurden drei Szenarien für die Einführung von höhergradig automatisierten Fahrzeugen betrachtet: die Evolution der Fahrerassistenzsysteme durch die etablierte Automobilindustrie, die Revolution der Individualmobilität durch automobilfremde Technologiefirmen und das Zusammenwachsen der Individualmobilität mit der öffentlichen Personenbeförderung als Transformation durch Firmenneugründungen und Mobilitätsdienstleister. Bisher scheinen diese drei Richtungen noch weitestgehend unabhängig voneinander beschritten zu werden bzw. bisweilen in Konkurrenz zu stehen. Allerdings können für die Einführung des höhergradig automatisierten Fahrens Synergien erschlossen werden, die sich besonders im Bereich der Infrastruktur und Akzeptanz in der Öffentlichkeit finden lassen. Dabei ist zu beobachten, dass alle drei Einführungsszenarien letztlich auf dasselbe Endszenario zusteuern, nämlich die heute von Menschen gesteuerten Fahrzeuge in Zukunft vollständig automatisiert zu betreiben und damit neue Anwendungsfälle, Geschäftsmodelle und auch verändertes Mobilitätsverhalten zu generieren.

Die unterschiedlichen Szenarien verdeutlichen, dass die höhergradig automatisierten Fahrzeuge voraussichtlich in unterschiedlichen Einsatzgebieten eingeführt werden, die sich sowohl hinsichtlich ihrer regionalen Lage als auch ihrer Größe unterscheiden. Außerdem ist zu vermuten, dass die Einführungszeitpunkte zwischen den Szenarien variieren und sich ein gestaffeltes Gesamtbild ergibt. Es kann verallgemeinernd in Aussicht gestellt werden, dass sich über die nächsten Dekaden bei der öffentlichen Einführung höhergradig automatisierter Fahrzeuge eine zeitliche Abfolge vom transformativen über das revolutionäre zum evolutionären Szenario ergeben mag. Die Einsatzgebiete würden dabei von lokaler über regionale bis hin zu globaler Reichweite wachsen.

Damit bleibt zu vermuten, dass sich zusätzlich zu den vollautomatisierten, langsam fahrenden und gebietsbeschränkten Mobilitätsangeboten, die derzeit im erweiterten Versuchsbetrieb in der Öffentlichkeit eingeführt werden, bis zum Ende dieser Dekade lokale vollautomatisierte Taxiangebote entwickeln könnten, die dann ab 2020 den generellen Betrieb höhergradig automatisierter Fahrzeuge auf Fern-, Land- und Stadtstraßen vorbereiten. Mit dieser Entwicklung lassen sich über die nächsten Jahrzehnte noch viele Poten-

ziale für die Steigerung der Sicherheit, Effizienz sowie des Komforts und der Produktivität beim Autofahren nutzen. Während die verschiedenen Szenarien durchaus Synergien untereinander nutzen können, ergeben sich weitere wertvolle Anknüpfungspunkte bei anderen Fahrzeugautomatisierungen, die beispielsweise von Logistikzentren, Containerhäfen, Landwirtschaft oder Tagebergbau bis hin zu Roboterfahrzeugen zur Erkundung entfernter Planeten reichen.

---

## Literatur

1. "Early Estimate of Motor Vehicle Traffic Fatalities in 2013", National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), Washington, USA (Mai 2014)
2. „Polizeilich erfasste Unfälle – Unfälle und Verunglückte im Straßenverkehr“, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, Deutschland (2014)
3. SAE International, "Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems" (16. Jan 2014)
4. "Traffic jam assistant", Bayerische Motoren Werke Unternehmenswebseite, [http://www.bmw.com/com/en/newvehicles/x/x5/2013/showroom/driver\\_assistance/traffic\\_jam\\_assistant.html#t=1](http://www.bmw.com/com/en/newvehicles/x/x5/2013/showroom/driver_assistance/traffic_jam_assistant.html#t=1) (abgerufen 27. Jun 2014)
5. „Der neue Passat – Generation 8: Technik-Preview“, Volkswagen Unternehmenswebseite, <http://www.volkswagen.de/de/technologie/der-neue-passat.html> (abgerufen 27. Jun 2014)
6. „DISTRONIC Plus with Steering Assist and Stop&Go Pilot in the S- and E-Class“, Daimler Unternehmenswebseite, <http://www.daimler.com/dccom/0-5-1210218-1-1210321-1-0-0-1210228-0-0-135-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0.html> (abgerufen 27. Jun 2014)
7. "Intelligent Parking Assist System", Wikipedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Intelligent\\_Parking\\_Assist\\_System](http://en.wikipedia.org/wiki/Intelligent_Parking_Assist_System) (abgerufen 27. Jun 2014)
8. Boeriu, H., "BMW Remote Controlled Parking", BMW Blog, <http://www.bmwblog.com/2010/10/10/bmw-remote-controlled-parking/> (10. Okt 2010, abgerufen 27. Jun 2014)
9. "Nissan Announces Unprecedented Autonomous Drive Benchmarks", Nissan Pressemitteilung (27. Aug 2012)
10. Preisinger, I., "Daimler aims to launch self-driving car by 2020", Reuters, <http://www.reuters.com/article/2013/09/08/us-autoshow-frankfurt-daimler-selfdrive-idUSBRE98709A20130908> (8. Sep 2013, abgerufen 27. Jun 2014)
11. Cheng, R., "General Motors President sees self-driving cars by 2020", cnet, <http://www.cnet.com/news/general-motors-president-sees-self-driving-cars-by-2020/> (25. Mar 2014, abgerufen 27. Jun 2014)
12. "Continental Strategy Focuses on Automated Driving", Continental Pressemitteilung (18. Dez 2012)
13. Becker, J. u.a., "Bosch's Vision and Roadmap Toward Fully Autonomous Driving", veröffentlicht in "Road Vehicle Automation", Springer Lecture Notes in Mobility (2014)
14. "ESC Installation Rates Worldwide by New Car Registration", Bosch Unternehmenswebseite, <http://www.bosch.co.jp/en/press/pdf/rbjp-1009-02-01.pdf> (abgerufen 27. Jun 2014)
15. McBride, B., "Vehicle Sales: Fleet Turnover Ratio", Calculated Risk, <http://www.calculatedriskblog.com/2010/12/vehicle-sales-fleet-turnover-ratio.html>, (26. Dez 2010, abgerufen 27. Jun 2014)
16. "What we're driving at", Google Official Blog, <http://googleblog.blogspot.com/2010/10/what-were-driving-at.html> (9. Okt 2010, abgerufen 27. Jun 2014)
17. Bilger, B. "Auto Correct – Has the self-driving car at last arrived?", The New Yorker [http://www.newyorker.com/reporting/2013/11/25/131125fa\\_fact\\_bilger](http://www.newyorker.com/reporting/2013/11/25/131125fa_fact_bilger) (25. Nov 2013, abgerufen 27. Jun 2014)

18. Wohlsen, M., "Jeff Bezos Says Amazon Is Seriously Serious About Drone Deliveries", Wired, <http://www.wired.com/2014/04/amazon-delivery-drones/> (11. Apr 2014, abgerufen 27. Jun 2014)
19. Ingram, A., "Nokia Joins Autonomous Car Development With \$100M Fund", Motorauthority, [http://www.motorauthority.com/news/1091948\\_nokia-joins-autonomous-car-development-with-100m-fund](http://www.motorauthority.com/news/1091948_nokia-joins-autonomous-car-development-with-100m-fund) (7. Mai 2014, abgerufen 27. Jun 2014)
20. King, I., "Intel Chases Sales on Silicon Road to Driverless Cars", Bloomberg, <http://www.bloomberg.com/news/2014-06-30/intel-chases-sales-on-silicon-road-to-driverless-cars.html> (29. Jun 2014, abgerufen 30. Jun 2014)
21. "High Definition Lidar", Velodyne Unternehmenswebseite, <http://velodynelidar.com/lidar/lidar.aspx> (abgerufen 27. Jun 2014)
22. "The latest chapter for the self-driving car: mastering city street driving", Google Official Blog, <http://googleblog.blogspot.de/2014/04/the-latest-chapter-for-self-driving-car.html> (28. Apr 2014, abgerufen 27. Jun 2014)
23. White, J.B., "Google Seeks Path To Market for Self-Driving Cars", The Wall Street Journal, <http://blogs.wsj.com/drivers-seat/2012/04/25/google-seeks-path-to-market-for-self-driving-cars/tab/print/> (25. Apr 2012, abgerufen 2014)
24. Stewart, J., "Google is to start building its own self-driving cars", BBC, <http://www.bbc.com/news/technology-27587558> (27. Mai 2014, abgerufen 27. Jun 2014)
25. Smith, A., "Google self-driving car is coming in 2017", The West Side Story, <http://www.thewestsidestory.net/2014/04/28/google-self-driving-car-coming-2017/> (28. Apr 2014, abgerufen 27. Jun 2014)
26. Pritchard, J., "5 facts about Google's self-driving cars (and why 2017 is still a reality)", Las Vegas Review Journal, <http://www.reviewjournal.com/life/technology/5-facts-about-google-s-self-driving-cars-and-why-2017-still-reality> (28. Apr 2014, abgerufen 27. Jun 2014)
27. Prada Gomez, L. R., Szybalski, A. T., Thrun, S., Nemecek, P., Urmson, C. P., "Transportation-aware physical advertising conversions", Patent US 8630897 B1, <https://www.google.com/patents/US8630897> (11. Jan 2011, abgerufen 27. Jun 2014)
28. Brustein, J., "From Google, Uber Gets Money and Political Muscle", Bloomberg Businessweek (26. Aug 2013)
29. Fehrenbacher, K., "Zappos CEO rethinks urban transportation in Vegas with 100 Tesla Model S cars", Gigaom, <http://gigaom.com/2013/04/03/zappos-ceo-rethinks-urban-transportation-in-vegas-with-100-tesla-model-s-cars/> (3. Apr 2013, abgerufen 27. Jun 2014)
30. Lardinois, F., "Google Awarded Patent For Free Rides To Advertisers' Locations", TechCrunch, [http://techcrunch.com/2014/01/23/google-awarded-patent-for-free-rides-to-advertisers-locations/?utm\\_source](http://techcrunch.com/2014/01/23/google-awarded-patent-for-free-rides-to-advertisers-locations/?utm_source) (23. Jan 2014, abgerufen 27. Jun 2014)
31. "Google Shopping Express", Google Unternehmenswebseite, <https://www.google.com/shopping/express> (abgerufen 27. Juni 2014)
32. "Mumbai eatery delivers pizza using a drone", The Times of India, <http://timesofindia.indiatimes.com/city/mumbai/Mumbai-eatery-delivers-pizza-using-a-drone/articleshow/35440489.cms> (21. Mai 2014, abgerufen 27. Jun 2014)
33. Pepitone, J., "Domino's tests drone pizza delivery", CNNMoney, <http://money.cnn.com/2013/06/04/technology/innovation/dominos-pizza-drone/index.html> (4. Jun 2013, abgerufen 27. Jun 2014)
34. Gannes, L., "Adventures in Google Self-Driving Cars: Pizza Delivery, Scavenger Hunts, and Avoiding Deer", All Things D, <http://allthingsd.com/20131117/adventures-in-google-self-driving-cars-pizza-delivery-savenger-hunts-and-avoiding-deer/> (17. Nov 2013, abgerufen 27. Jun 2014)
35. Grifantini, K., "Robots Take Out the Trash", MIT Technology Review, <http://www.technologyreview.com/view/420608/robots-take-out-the-trash/> (1. Sep 2010, abgerufen 27. Jun 2014)
36. "Timeline Google Street View", Wikipedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Timeline\\_of\\_Google\\_Street\\_View](http://en.wikipedia.org/wiki/Timeline_of_Google_Street_View) (abgerufen 27. Jun 2014)

37. "Google Glass", Wikipedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Google\\_glass](http://en.wikipedia.org/wiki/Google_glass) (abgerufen 27. Jun 2014)
38. "Induct Launches Navia, The First 100 Percent Electric, Self-Driving Shuttle In The U.S.", Induct Pressemitteilung, <http://www.prnewswire.com/news-releases/induct-launches-navia-the-first-100-percent-electric-self-driving-shuttle-in-the-us-238980311.html> (6. Jan 2014, abgerufen 28. Jun 2014)
39. "Induct presents world's first fully-electric driverless shuttle: the Navia", Induct Pressemitteilung, <http://induct-technology.com/en/files/2012/12/Navia-press-release.pdf> (6. Dez 2012, abgerufen 27. Jun 2014)
40. Counts, N., "SMART Driverless golf cart provides a glimpse into a future of autonomous vehicles", MIT News, <http://newsoffice.mit.edu/2013/smart-driverless-golf-cart-provides-a-glimpse-into-a-future-of-autonomous-vehicles> (9. Dez 2013, abgerufen 27. Jun 2014)
41. "AKKA link&go 2.0 electric self-driving concept designed for future cities", Designboom, <http://www.designboom.com/technology/akka-linkgo-2-0-electric-driverless-concept-car-for-the-city-of-the-future-03-12-2014/> (12. Mrz 2014, abgerufen 27. Jun 2014)
42. Halliday, J., "Driverless cars set to roam Milton Keynes from 2017, says Vince Cable", The Guardian, <http://www.theguardian.com/technology/2013/nov/07/driverless-cars-coming-to-milton-keynes> (7. Nov 2014, abgerufen 27. Jun 2014)
43. "CityMobil2 selects first seven sites", ITS International, <http://www.itsinternational.com/sections/general/news/citymobil2-selects-first-seven-sites/> (7. Mai 2014, abgerufen 27. Jun 2014)
44. "The SARTRE Project", <http://www.sartre-project.eu/en/Sidor/default.aspx> (abgerufen 27. Jun 2014)
45. "Connected Vehicle Safety Pilot Program", U.S. Department of Transportation / Research and Innovative Technology Administration, Facts Sheet, FHWA-JPO-11-031, 2011, [http://www.its.dot.gov/factsheets/pdf/SafetyPilot\\_final.pdf](http://www.its.dot.gov/factsheets/pdf/SafetyPilot_final.pdf) (2011, abgerufen 27. Jun 2014)
46. "Car 2 Car Communication Consortium", Car2Car Projektwebseite, <http://www.car-to-car.org> (abgerufen 27. Jun 2014)
47. „simTD: Mit Car-to-X-Kommunikation die Zukunft der Verkehrssicherheit und Mobilität gestalten“, simTD Projektwebseite, <http://www.simtd.de/index.dhtml/deDE/index.html> (abgerufen 27. Jun 2014)
48. "Car-to-car communication coming soon to Japan", Nikkei Asia Review, <http://asia.nikkei.com/Tech-Science/Tech/Car-to-car-communication-coming-soon-to-Japan> (18. Mrz 2014, abgerufen 27. Jun 2014)
49. National Highway Traffic Safety Administration, "Preliminary Statement of Policy Concerning Automated Vehicles", National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) Publication 14-13, Washington, USA (30. Mai 2013)
50. "Japanese government aims to implement driverless technology", <http://www.driverless-future.com/?p=272> (27. Jun 2012, abgerufen 27. Jun 2014)
51. Quigley, J.T., "Japanese Prime Minister 'Test Drives' Autonomous Vehicles", The Diplomat, <http://thediplomat.com/2013/11/japanese-prime-minister-test-drives-autonomous-vehicles/> (12. Nov 2013, abgerufen 27. Jun 2014)
52. "Volvo Car Group initiates world unique Swedish pilot project with self-driving cars on public roads", Volvo Cars Presseveröffentlichung (2. Dez 2013)
53. "Advancing map-enhanced driver assistance systems", ERTICO Projektwebseite, <http://www.ertico.com/adasisforum> (abgerufen 27. Jun 2014)
54. "Action for advanced Driver assistance and Vehicle control systems Implementation, Standardisation, Optimum use of the Road network and Safety", ADVISORS Projektwebseite, <http://www.advisors.iao.fraunhofer.de> (abgerufen 27. Jun 2014)

55. "Netherlands wants to approve large-scale self-driving car test", Automotive IT, <http://www.automotiveit.com/netherlands-wants-to-ok-large-scale-self-driving-car-test/news/id-009301> (20. Jun 2014, abgerufen 27. Jun 2014)
56. Winner, H., "Mercedes und der Elch: Die perfekte Blamage", <http://www.welt.de/motor/article1280688/Mercedes-und-der-Elch-Die-perfekte-Blamage.html> (21. Okt 2007, abgerufen 27. Juni 2014)
57. Holm, C., „Blanke Nerven an der Donau“, Der Spiegel, <http://www.spiegel.de/spiegel/print/d-15502670.html> (24. Jan 2000, abgerufen 27. Juni 2014)
58. "Toyota Enters Agreement with U.S. Attorney's Office Related to 2009-2010 Recalls"; Toyota Pressemitteilung, <http://corporatenews.pressroom.toyota.com/releases/toyota+agreement+attorneys+southern+district+ny.htm> (19. März 2014, abgerufen 27. Jun 2014)
59. Elmer, S., "2013 Infiniti JX35 Under NHTSA Investigation for Intelligent Braking Issues", Autoguide, <http://www.autoguide.com/auto-news/2012/07/2013-infiniti-jx35-under-nhtsa-investigation-for-intelligent-braking-issues.html> (30. Jul 2012, abgerufen 27. Juni 2014)

Dirk Heinrichs

## Inhaltsverzeichnis

<b>11.1 Einleitung</b> .....	220
<b>11.2 Autonomes Fahren als Bestandteil von Szenarien zur Stadt von morgen</b> .....	221
11.2.1 Regenerative und intelligente Stadt .....	222
11.2.2 Hypermobiler Stadt .....	224
11.2.3 Endlose Stadt .....	225
11.2.4 Diskussion .....	226
<b>11.3 Autonomes Fahren und Einfluss auf die Stadtstruktur</b> .....	228
11.3.1 Das autonome Privatfahrzeug .....	228
11.3.2 Das autonome Taxi als integrierter Teil des öffentlichen Verkehrs .....	232
<b>11.4 Wesentliche Treiber für die Entwicklung eines Verkehrssystems mit automatisierten Fahrzeugen in Städten</b> .....	234
<b>11.5 Zusammenfassung und Ausblick</b> .....	236
11.5.1 Aspekte in der Diskussion um automatisiertes Fahren aus Sicht der Stadtentwicklung und Stadtplanung .....	236
<b>Literatur</b> .....	238

---

D. Heinrichs (✉)

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Verkehrsforschung, Deutschland  
Dirk.Heinrichs@dlr.de

## 11.1 Einleitung

Mobilität, Verkehr und die physische Gestalt städtischer Räume sind eng miteinander verknüpft [1]. Die Stadtstruktur bildet eine wichtige Grundlage für Mobilitätsentscheidungen von Haushalten und Unternehmen und gibt in entscheidendem Maße vor, welche Formen von Verkehr ermöglicht oder aber auch ausgeschlossen werden. Kompakte Stadtstrukturen mit hoher Dichte und Nutzungsmischung bieten gute Voraussetzungen für kurze Wege, ein leistungsfähiges öffentliches Verkehrsangebot, fördern den Fuß- und Radverkehr und machen die Nutzung des Kraftfahrzeugs im Alltag oft unnötig. Ist die Stadtstruktur hingegen zersiedelt und weist sie eine geringe Dichte auf, werden Fuß- und Radverkehr erschwert, und der motorisierte Individualverkehr wird begünstigt. Die Verfügbarkeit und die Nutzung von bestimmten Verkehrsmitteln üben wiederum einen starken Einfluss auf städtische Strukturen und die notwendigen Infrastrukturen aus. So wurde die Wohn-Suburbanisierung der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts in starkem Maß durch die Verfügbarkeit des Pkw und den Ausbau der Verkehrsinfrastruktur für den motorisierten Individualverkehr gefördert [2].

Erwartungen gehen davon aus, dass mit dem vollautomatisierten Fahren ein ganz neues Verkehrssystem entsteht, das nicht nur neue Möglichkeiten der Verkehrssteuerung mit sich bringt, sondern auch ganz neue Beförderungsangebote generiert, welche die Wahl und Nutzung von zur Verfügung stehenden Verkehrsmitteloptionen beeinflussen (s. Kap. 12). Die Vorstellung, dass beispielsweise die Zeit im Fahrzeug nicht mit Fahraufgaben verbracht werden muss, sondern andere Aktivitäten zulässt, kann eine vollständige Neubewertung des Faktors Zeit nach sich ziehen (z. B. [28]). Dies kann dazu führen, dass Nutzer für ihre täglichen Wege andere (weiter entfernte) Ziele in Betracht ziehen oder gar ihre Wohnstandortwahl verändern, da lange Pendelwege nicht mehr als nachteilig gesehen werden. Denkt man diese Zusammenhänge konsequent weiter, so wäre letztlich die Auflösung des Faktors Zeit als begrenzende Variable der Stadtentwicklung möglich. Wird also die Verfügbarkeit vollautomatisierter Fahrzeuge das Wechselverhältnis zwischen Mobilität und städtischen Strukturen völlig neu definieren? Zu dieser Frage existieren mit wenigen Ausnahmen [3] noch keine Vorstellungen. Die Visionen zur Integration des autonomen Fahrzeugs in das städtische Verkehrssystem beziehen sich derzeit im Wesentlichen noch auf die Entwicklung der Fahrzeugtechnologie selbst und die Auswirkungen auf den Verkehrsfluss.

Vor diesem Hintergrund ist es Ziel dieses Beitrags, die möglichen stadtstrukturellen Entwicklungen unter dem Einfluss eines Verkehrssystems mit autonomen Fahrzeugen auszuloten. Gleichmaßen soll abgeschätzt werden, in welcher Weise politische und ökonomische Rahmenbedingungen diese Entwicklungen beeinflussen können. Die folgenden Fragen stehen dabei im Vordergrund:

- Welche zukünftigen Möglichkeiten eines durch automatisiertes Fahren veränderten bzw. veränderbaren Verkehrssystems sind denkbar?
- Welche Auswirkungen auf Stadtstrukturen, insbesondere auf deren Dichte, Nutzungsmischung und Gestaltung, könnten zukünftig damit verbunden sein?



- Welche Einflussfaktoren sind besonders bedeutsam für die Entwicklung eines Verkehrssystems mit automatisierten Fahrzeugen in Städten?
- Welche Aspekte sollten in die Diskussion um das automatisierte Fahren aus Sicht der Stadtentwicklung und Stadtplanung zwingend mit einfließen, aber auch: In welcher Weise sollte die Diskussion um die Entwicklung der Städte das Thema „Automatisierung des Verkehrs“ aufgreifen?

Als Basis für die Untersuchung dieser Fragen wertet der Beitrag verfügbare aktuelle Szenarien zur Stadt der Zukunft aus. Der folgende Abschn. 11.2 stellt die in der Literatur verfügbaren Szenarien bzw. Visionen zur „Stadt von morgen“ und deren Vorstellungen bezüglich einer Integration von Verkehrssystemen mit autonomen Fahrzeugen vor. Auf dieser Grundlage beschreibt er, welche unterschiedlichen zukünftigen Möglichkeiten eines durch automatisiertes Fahren veränderten bzw. veränderbaren Verkehrssystems denkbar sind, in welchen städtischen Strukturen sie sich entwickeln und welche wesentlichen Einflussfaktoren die Autoren für die Entwicklung zugrunde legen.

Aufbauend darauf führt Abschn. 11.3 eine vertiefte Analyse anhand von zwei vom Autor entwickelten idealisierten Szenarien des zukünftig denkbaren „automatisierten Verkehrssystems“ durch. Kern dieser Szenarien ist a) das autonome Privatfahrzeug; b) das autonome Fahrzeug als integrierter Teil des öffentlichen Verkehrs. Auf der Grundlage einer kurzen Charakterisierung beider Szenarien wird analysiert, welche zukünftigen Auswirkungen auf Stadtstrukturen mit dem jeweiligen Szenario verbunden sein könnten.

Abschnitt 11.4 lotet aus, welche Einflussfaktoren besonders bedeutsam für die Entwicklung eines Verkehrssystems mit automatisierten Fahrzeugen in Städten sein könnten. Für die vorgestellten Szenarien werden die wesentlichen Treiber benannt.

Der abschließende Abschn. 11.5 fasst die wesentlichen Erkenntnisse zusammen. Er diskutiert, welche Aspekte in die Diskussion um das automatisierte Fahren aus Sicht der Stadtentwicklung und Stadtplanung zwingend mit einfließen sollten, aber auch, in welcher Weise der Diskurs um die Stadtentwicklung und -planung das autonome Fahren aufgreifen sollte.

---

## **11.2 Autonomes Fahren als Bestandteil von Szenarien zur Stadt von morgen**

Da automatisiertes Fahren in Städten gegenwärtig noch nicht Realität ist und damit Wirkungen auf Stadtstrukturen derzeit noch nicht beobachtbar sind, bieten Szenarien eine Möglichkeit, denkbare zukünftige Entwicklungen und Zusammenhänge heranzuziehen. Szenarien beschreiben sowohl eine denkbare zukünftige Situation als auch die Entwicklung des Weges, der aus dem Heute in die Zukunft hineinführt [4, 5]. Sie stellen ein anerkanntes Instrument dar, mit dem sich Veränderungen, ihre Treiber sowie die Folgen in einem teilweise unbekanntem, unsicheren und sich rasch ändernden Umfeld aufdecken und strukturieren lassen [6].

Für die nachfolgende Darstellung erfolgte eine systematische Auswertung verfügbarer Studien zur Stadt der Zukunft, in denen die Entwicklung der Mobilität bzw. des Verkehrs thematisiert wird. Aus der Gesamtheit der Dokumente wurden Kerndokumente und darin dargestellte Szenarien ausgewählt, die folgende Kriterien erfüllen: eine nachvollziehbare Darstellung eines Zielzustands und eines Entwicklungspfades, die Identifikation von Triebkräften und ihren Interdependenzen, die Behandlung des Themas Mobilität und Darstellung der Wechselwirkungen mit der Siedlungsstruktur. Diese Dokumente wurden im Anschluss zu Typen vergleichbarer Ausprägungen zusammengefasst und dahingehend ausgewertet, welche Formen und Bedeutung automatisierten Fahrens beschrieben werden bzw. welche Veränderungen diese Entwicklung maßgeblich prägen. Die Abgrenzung zueinander erfolgte entlang zweier Unsicherheitsachsen, die für die Auseinandersetzung mit dem automatisierten Fahren besonders relevant sind: die Verfügbarkeit und Integration intelligenter Kommunikationsinfrastruktur (gering bzw. hoch) sowie die Akzeptanz und Nutzung dieser Infrastruktur allgemein bzw. für die Mobilität durch die städtische Bevölkerung (gering bzw. hoch).

Die in den als Kerndokumenten eingestuft beschriebenen Szenarien lassen sich im Wesentlichen drei Typen zuordnen:

- regenerative und intelligente Stadt,
- hypermobile Stadt,
- endlose Stadt.

Nachfolgend werden die Szenarien näher erläutert.

### **11.2.1 Regenerative und intelligente Stadt**

Eine Reihe von Zukunftsstudien heben die Entwicklung sogenannter regenerativer Städte als einen denkbaren Entwicklungspfad hervor [7, 8, 9, 10, 11, 12]. Diese Studien sehen für den Zeitraum 2030–2050 technologische Entwicklungen als Kern und Triebkraft städtischer Veränderung, welche den Ressourceneinsatz effizient und umweltverträglich gestalten. Im Mittelpunkt stehen der energetische Umbau von Gebäuden (Solarisierung, Plus-Energiehäuser) und die zunehmende Nutzung dezentral erzeugter Energien aus erneuerbaren Quellen, welche über sogenannte Microgrids bzw. Peer-to-peer-Energiesysteme verteilt und geteilt werden. Unterstützt werden sie durch intelligente Steuerungsmechanismen, die eine Verknüpfung mit anderen Bereichen städtischer Funktionen wie Mobilität ermöglichen. Die Bedeutung von Intelligenz und Information wird in den entsprechenden Studien hervorgehoben. Sie beschreiben den Wandel hin zu einem technologischen Regime, welches nicht mehr durch Technologien für einzelne Sektoren (Energie, Verkehr, Abfall etc.) charakterisiert wird, sondern ein hohes Maß an Integration zwischen den Sektoren gewährleistet.

Im Zuge dieser technologischen Entwicklung vollzieht sich ein Verhaltenswandel der städtischen Bevölkerung [7]. Es wird allgemein ein nachhaltiger Konsum als sehr bewuss-

ter und verantwortlicher Umgang mit Ressourcen angenommen [9]. Erklärt wird dies durch den in Zukunft stärker werdenden Wunsch der konsumierenden Stadtbevölkerung nach Wohlbefinden und Lebensqualität, die sich anders definiert als über ökonomischen Wohlstand. Von der Gesellschaft wird eine energieoptimierte, nachhaltige und zukunftsfähige Mobilität getragen, weil die Mehrheit der Bevölkerung deren Vorteile nicht nur in den Medien präsentiert bekommt, sondern im eigenen Alltag erleben kann.

Der Schlüssel dazu liegt in den dicht bewohnten Metropolregionen, in denen eine vielfältig vernetzte und dennoch einfache und bezahlbare Mobilitätsversorgung gewährleistet ist. Städte werden in diesen Szenarien als Orte charakterisiert, die aufgrund ihrer Dichte eine effiziente Ressourcennutzung ermöglichen. Hinzu kommt die Annahme, dass mit der wachsenden Bedeutung von Städten als ökonomische und soziale Zentren die Entscheidungs- und Handlungspotenziale auf städtischer Ebene in Zukunft zunehmen. Eine Reihe der analysierten Studien verweist darauf, dass Städte wie London bereits heute demonstrieren, dass sich städtische Infrastrukturen umgestalten und dezentrale innovative Ansätze für Energie und Abfall umsetzen lassen, ohne dass nationale Politik erforderlich ist. Städte wandeln sich, getrieben durch Wettbewerb (untereinander) sowie durch Politik und Verwaltung, welche aktiv daran arbeiten, die Standortqualitäten zu verbessern.

Im Zuge des ressourceneffizienten Umbaus der Städte wandeln sich auch die Bedingungen für Mobilität in der regenerativen und intelligenten Stadt. Das Verkehrssystem erfährt eine zunehmende Durchdringung mit Informations- und Kommunikationstechnologie. Darin sehen die analysierten Studien die Grundlage für den Ausbau bedarfsorientierter Mobilitätsmanagementansätze und die Verknüpfung von Verkehrsangeboten zu einem künftigen flexiblen, multimodalen Verkehrssystem (s. Kap. 9). Der ÖPNV als Rückgrat der städtischen Mobilität wird weiter ausgebaut und laufend modernisiert, in integrierter Planung im Umweltverbund mit Fuß- und Fahrradwegen, deren Anteil am Straßenraum zunimmt. Ergänzend dazu stehen den Bürgerinnen und Bürgern individuell nutzbare Verkehrsmittel (Fahrräder, e-Bikes, Elektroautos, Elektrotransporter) zur Verfügung, und zwar zeitlich dann und örtlich dort, wann und wo der individuelle Bedarf besteht (*mobility on demand*). Diese „Sharing“-Angebote nach dem Prinzip „nutzen statt besitzen“ werden von verschiedenen Anbietern auf- und ausgebaut und helfen, die derzeit vom motorisierten Individualverkehr beanspruchte Fläche im öffentlichen Raum stark zu verringern. Ein persönlicher, mobiler und elektronischer Mobilitätsassistent ermöglicht es, alle für die tägliche Mobilität zur Verfügung stehenden Handlungsalternativen abzuwägen und situationsspezifisch optimale Varianten auszuwählen.

Die Weiterentwicklung elektronischer Assistenzsysteme für Pkw wird in den Studien im Zusammenhang mit der Entwicklung effizienterer neuer Antriebsformen thematisiert. Es wird davon ausgegangen, dass das eigene Fahrzeug auch in Zukunft seine Bedeutung behalten wird [11]. Verschiedene Studien erwarten die Präsenz von Fahrzeugen im Zeitraum 2030–2050, in denen fest eingebaute elektronische Assistenzsysteme für teilautonome Nutzungen zur Standardausrüstung gehören. Beispielsweise auf Autobahnen mit hohem Transitaufkommen oder Pendlerstrecken ermöglichen sie die Fahrt mit dem Autopiloten, womit eine Optimierung des Verkehrsflusses erreicht wird. Sichergestellt wird dies durch

eine hohe Vernetzung und Kommunikation zwischen Fahrzeug und Verkehrsinfrastruktur. Diese Entwicklung wird flankiert durch neue Gesetzgebung bezüglich Zulassung, Haftungsrecht und Versicherungswesen sowie durch ein Akzeptanz schaffendes Konzept des Staates zu den Themen Datenmanagement und Standardisierung von Daten (*Open Source*, Schnittstellenkompatibilität, Datenschutz und Sicherheit).

Im Zuge der Veränderungen des Mobilitätsangebots beschreiben die untersuchten Studien auch einen Wandel der räumlichen Struktur der Städte. Die Verknüpfung von Verkehrsangeboten, so die Autoren, verstärkt die bereits heute zu beobachtende Herausbildung von sogenannten Mobilitätsknoten. Es wird davon ausgegangen, dass sich in Zukunft Stadtquartiere um diese Knoten herum in einer polyzentrischen Stadtstruktur organisieren. Der Flächenverbrauch für Stellflächen im Stadtraum hat sich deutlich reduziert. Die Gründe hierfür sind eine dynamische Verteilung der Fahrzeuge in Stadtquartieren sowie automatisierte „Parkregale“, die ein platzsparendes Abstellen von Fahrzeugen sicherstellen.

### 11.2.2 Hypermobile Stadt

Die hypermobile Stadt als ein denkbarer Entwicklungspfad wird insbesondere in einer Studie des Foresight Directorate des UK Office of Science and Technology thematisiert [7]. Beschrieben wird die Entwicklung einer Gesellschaft bis in das Jahr 2055, in der kontinuierliche Information, Konsum und Wettbewerb die Norm sind [7].

Auch dieses Szenario geht, wie im Fall der regenerativen Stadt, davon aus, dass durch technologische Entwicklung und Innovation derzeit noch existierende Barrieren zum individuellen Nutzen einer Mehrheit der Gesellschaft überwunden werden, aber mit einem weiterhin sehr hohen Bedarf an Ressourcen und den entsprechenden Umweltfolgen. Ein wesentliches Element und Treiber für die Entwicklung ist die Akzeptanz der Entwicklung elektronischer und digitaler Infrastruktur, wie beispielsweise die Nutzung von Kameras für den virtuellen Austausch oder von persönlichen Informationsassistenten. Ist diese Akzeptanz derzeit noch gering, so nimmt sie aufgrund ihrer Vorteile für Lebensstil und Handel in den kommenden Jahrzehnten deutlich zu. Menschen in der Stadt der Zukunft sind *always on*, ob zuhause oder am Arbeitsplatz. Dazu nutzen sie personalisierte, mit Verschlüsselungstechnologie ausgestattete Assistenten, mit deren Hilfe sie sich umfassend organisieren und ihren Alltag planen. Auch wenn in dem Szenario die Probleme und Vorbehalte bezüglich Datenschutz und Privatsphäre sehr deutlich thematisiert werden, so werden diese letztlich aufgrund des Wertes der elektronischen Assistenten für die Nutzer an die Seite gedrängt.

Der Staat und der Privatsektor haben auf dem Weg in das Jahr 2055 miteinander kooperiert, um die erforderlichen Technologien zu entwickeln. Zu den treibenden Interventionen gehören die starke Förderung von nutzerbezogener Informations- und Kommunikationstechnologie (persönliche Assistenzsysteme, die Vereinheitlichung von Kommunikationsstandards und GPS) sowie Technologieentwicklung (Verschlüsselungstechnologien, Sensoren, Ortung). Eine wichtige Voraussetzung auf dem Weg sind starke Bemühungen um die Datensicherheit auf europäischer Ebene.

Die Mobilität im Zieljahr dieses Szenarios (2055) wird als ausgesprochen vernetzt beschrieben. Die Autoren zeichnen eine Entwicklung, in der die Mobilitätsnachfrage weiter ansteigt. Die starke Ausrichtung auf Informations- und Kommunikationstechnologie hat in diesem Szenario auch die Automatisierung der Mobilität und des Verkehrs vorangetrieben, nicht zuletzt um die Verkehrsflüsse zu optimieren und Staus zu mindern. In den Städten ersetzen integrierte Massentaxi-Systeme weitgehend den gewöhnlichen öffentlichen Verkehr. Diese übernehmen das effiziente Abholen und Verteilen von Fahrgästen in Zustiegszonen. Die dafür eingesetzten lokalen Beförderungsfahrzeuge operieren in zugewiesenen Stadtgebieten und werden von Nutzern mithilfe ihres persönlichen Assistenten angefordert. Das Netzwerk kalkuliert die effizienteste Route, auch für das Abholen und Absetzen von mehreren Passagieren, und berechnet den Fahrpreis. Dieses auch als „Schwarm“ bezeichnete Netzwerk kann große Datenmengen über die Verkehrslage und Nachfragepositionen verarbeiten. Die Fahrzeuge können ihre Route anpassen. Passagiere können jedes Fahrzeug nutzen, anstatt auf eine bestimmte Linie warten zu müssen.

Autonome Fahrzeuge verkehren auf Autobahnen für Langstrecken auf einer eigens für sie reservierten *guided lane*, einige auch für Anwendungen über Nacht. Menschen kaufen größere Autos und fahren weitere Strecken. Diese Fahrzeuge sind mit einer *on-board driverless unit* ausgestattet, welche mit automatisierten Systemen entlang der Autobahnen sowie wesentlicher Pendler Routen kommunizieren. In dieser Form entstehen Züge automatisch kontrollierter Fahrzeuge, welche mit hoher Geschwindigkeit eng zusammen fahren.

Die Entwicklung städtischer Strukturen wird in diesem Szenario differenziert beschrieben. Einerseits entstehen stark verdichtete Innenstädte, andererseits setzt sich das Wachstum suburbaner Gebiete geringer Dichte fort. Während vor allem jüngere Menschen die urbanen Zentren als Lebensort bevorzugen, entscheidet sich eine wachsende Zahl einkommensstarker Haushalte für einen Umzug an die Ränder der Städte oder in ländliche Gebiete. Trotz steigender Entfernung zu den in der Innenstadt gelegenen Arbeitsplätzen können sie weiter am intensiven Arbeitsleben teilnehmen, entweder mithilfe von Telepräsenz unter Nutzung noch leistungsfähigerer Kommunikationsinstrumente oder durch die bequeme Nutzung des automatisierten Fahrzeugs. Gleichzeitig verschafft sich diese Bevölkerungsgruppe durch das suburbane Wohnen das Gefühl und die Möglichkeit, sich von dem zunehmend anstrengenden und fordernden Arbeitsleben in der hypermobilen Welt zu erholen.

### 11.2.3 Endlose Stadt

Während die Szenarien der regenerativen und der hypermobilen Stadt die technologische Entwicklung als einen Motor für Veränderungen von städtischen Lebensweisen, Mobilität und städtischen Strukturen in den Vordergrund stellen, thematisieren andere Szenarien ein konträres Bild [12].

Die hier zugrunde liegenden Annahmen sind, dass sich technologische Innovationen nicht in dem umfassenden Maße durchsetzen, insbesondere aufgrund der hohen Kosten für

erforderliche Infrastrukturen. Technologische Entwicklung findet zwar statt, ist aber vornehmlich auf Effizienzgewinne einzelner Bereiche (Verbrennungsmotoren, Solarenergie) beschränkt. Die Steuerungsmöglichkeiten des Staates werden als begrenzt gesehen. Auch ein Verhaltenswandel, wie in den vorherigen Entwicklungen skizziert, wird nicht sichtbar.

Hinsichtlich Mobilität und Raumstruktur sehen die Autoren dieses Szenarios ein auto-dominiertes Modell weiterhin deutlich ausgeprägt. Im öffentlichen Verkehr werden sich in vielen Städten aufgrund staatlich begrenzter Kapazitäten zur Weiterentwicklung des öffentlichen Verkehrssystems sogenannte informelle Paratransit-Dienste weiterentwickeln. Der Vernetzungsgrad mit vorhandenen Angeboten bleibt gering. Die Möglichkeit eines autonomen Verkehrssystems wird nicht thematisiert. Räumlich sind Städte durch eine niedrige Dichte und fragmentierte Siedlungsstrukturen gekennzeichnet. Diesbezüglich schreiben die Autoren einen derzeit global zu beobachtenden Trend fort [13].

### 11.2.4 Diskussion

Die hier dargestellte Auswahl und Analyse zeigt, dass Szenarien die Möglichkeit eines durch automatisiertes Fahren veränderten bzw. veränderbaren Verkehrssystems teilweise thematisieren. Automatisierte Lösungen werden insbesondere in Szenarien mit hoher Durchdringung und Verknüpfung innovativer Kommunikations- und Ortungstechnologie formuliert (regenerative und hypermobile Stadt). Automatisiertes Fahren im städtischen Kontext wird dabei als Beitrag im öffentlichen Verkehr erwartet. Die Szenarien beschreiben beispielsweise den Einsatz von stapel- und programmierbaren Kleinstfahrzeugen oder ein integriertes Massentaxi-System. Das automatisierte Privatfahrzeug findet im Zuge des Langstreckenverkehrs auf Autobahnen Erwähnung (s. Tab. 11.1).

Mit Blick auf die Auswirkungen durch automatisiertes Fahren auf die Stadtstruktur beschreiben die unterschiedlichen Szenarien zunächst den Zusammenhang mit einem allgemeinen Wandel der Rahmenbedingungen. Das Szenario der regenerativen Stadt zeigt sich in einer zunehmenden Dichte von Bevölkerung und Funktionen in Städten. Andere Szenarien (hypermobile und endlose Stadt) gehen von einer Fortführung derzeit global zu beobachtender Suburbanisierungstendenzen als Folge individueller Präferenzen einkommensstarker Haushalte oder aufgrund von Abdrängungsprozessen einkommensschwächerer Haushalte aus. Als sichtbare Veränderung der Stadtstruktur durch ein Verkehrssystem mit Elementen des automatisierten Fahrens wird in verschiedenen Szenarien die Entstehung sogenannter Mobilitätshubs oder -knoten beschrieben. Im Szenario der regenerativen und intelligenten Stadt wird die Vorstellung der Vernetzung konsequent auf den Stadtraum übertragen. Multimodale Verkehrsknoten ermöglichen eine physische Vernetzung und einen einfachen Umstieg zwischen verschiedenen Modi wie beispielsweise vom (Elektro-) Auto auf öffentliche Verkehrsmittel. Das Szenario geht noch einen Schritt weiter, indem es über die Bündelung unterschiedlicher Mobilitätsangebote auch von einer Änderung sonstiger Nutzungen ausgeht. Es beschreibt Stadtquartiere, die sich rund um Mobilitätsknoten und Versorgungsdienstleistungszentren organisieren und bei denen automatisierte Fahr-

**Tab. 11.1** Die Szenarien im Überblick

Szenario	Ausprägung autonomen Fahrens	Stadtstruktur	Treiber
Regenerative Stadt	<ul style="list-style-type: none"> <li>flexibles, multimodales und vernetztes öffentliches Verkehrssystem als Rückgrat der städtischen Mobilität</li> <li>(teil)-autonome Pkw (Autopilot) auf Autobahnen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Herausbildung von intermodalen Mobilitätsknoten</li> <li>Reduktion des Flächenverbrauchs für Stellflächen im Stadtraum durch neue Parksyste</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>technologische Entwicklung (im Energiesystem)</li> <li>bewusster und verantwortlicher Umgang mit Ressourcen</li> <li>Gesetzgebung und Akzeptanzförderung durch den Staat</li> </ul>
Hypermobile Stadt	<ul style="list-style-type: none"> <li>hoch integrierte (autonome) Massentaxi-Systeme</li> <li>autonome Pkw auf Autobahnen mit hohem Transitaufkommen oder Pendlerstrecken auf reservierten <i>guided lanes</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>stark verdichtete Innenstädte</li> <li>Wachstum suburbaner Gebiete geringer Dichte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>zunehmende Akzeptanz von Informations- und Kommunikationstechnologien aufgrund ihrer Vorteile für Lebensstil und Handel</li> <li>Kooperation von Staat und Privatsektor, um erforderliche IKT-Technologien zu entwickeln</li> </ul>
Endlose Stadt	<ul style="list-style-type: none"> <li>autodominantes Modell vorherrschend</li> <li>geringe Integration des öffentlichen Verkehrs (hoher Anteil informeller <i>Paratransit</i>-Angebote)</li> <li>keine nennenswerten Entwicklungen hin zu automatisiertem Fahren</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wachstum suburbaner Gebiete</li> <li>generelle Abnahme der Siedlungsdichte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>fehlende Steuerungsfähigkeit des Staates</li> <li>technologische Entwicklung beschränkt auf Effizienzgewinne einzelner Bereiche</li> </ul>

Eigene Darstellung, basierend auf [7–12]

zeuge als Teil der öffentlichen Fahrzeugflotte einbezogen sind. Auch das Parken und seine Verknüpfung mit dem Raum werden in nahezu allen Szenarien in sehr unterschiedlicher Weise thematisiert. Das Szenario der regenerativen Stadt beschreibt den Rückgang des Flächenbedarfs im Zusammenhang mit dem sinkenden Anteil privater Pkw und einem dezentralen Parkraummanagement. In der intelligenten Stadt der Zukunft hat sich eine Verknüpfung der Nutzung des eigenen Pkws mit dem öffentlichen Verkehr durchgesetzt, und es entstehen neue P+R-Flächen an Mobilitätsknoten.

Insbesondere die Beschreibungen zur intelligenten und regenerativen Stadt sind dabei geprägt durch die Grundüberzeugung, dass die Technologie derzeit existierende bzw. ab-

sehbare Probleme (Ressourcenknappheit, Umweltwandel) überwinden wird. Die zentrale Bedeutung technologischer Entwicklung wird auch im Szenario der endlosen Stadt bestätigt, allerdings aus der umgekehrten Perspektive. Dort wird das Fehlen von Innovation als Erklärung für eine Reihe negativer Entwicklungen interpretiert. Dieses Szenario steht in gewissem Sinne für eine denkbare Entwicklung in Städten des globalen Südens, in denen die Steuerungskapazitäten des Staates als vergleichsweise gering eingestuft werden.

Eine kritische Auseinandersetzung mit dem Thema Daten erfolgt lediglich im Szenario der hypermobilen Stadt. Probleme des Datenschutzes und der Sicherheit gelten dort im Zielzeitraum um 2050 als gesellschaftlich akzeptiert, da die individuellen Vorteile der Informations- und Kommunikationslösungen für die Teilhabe in sozialen Netzwerken und im Arbeitsleben die Nachteile aus Sicht der Bevölkerung überwiegen.

---

### 11.3 Autonomes Fahren und Einfluss auf die Stadtstruktur

Die im vorherigen Abschnitt dargestellten Szenarien entwickeln eine Vorstellung davon, in welcher Form das automatisierte Fahren in der Stadt der Zukunft als ein Bestandteil des Verkehrssystems denkbar ist. Im Folgenden wird ein näherer Blick auf die möglichen Veränderungen der Stadtstruktur gelegt, die sich in dem Zusammenhang ergeben: Wie ändern sich Verteilung von Nutzungen, Dichte und Gestaltung städtischer Räume unter dem Einfluss autonomen Fahrens?

Die genannten Szenarien zeigen, dass voneinander grundsätzlich unterscheidbare Optionen denkbar sind. Zum einen beschreiben sie die Entwicklung eines autonomen Privatfahrzeugs, welches je nach Szenario „bordautonom“ durch einen Autopiloten gesteuert wird oder durch Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation in den Verkehrsfluss eingebunden ist. Zum anderen sehen die Szenarien das autonome Fahren als integrierten Teil des öffentlichen Verkehrsangebots. Es ist davon auszugehen, dass die Wirkungen auf die Stadtstruktur abhängig von der Ausprägung des autonomen Verkehrssystems sehr unterschiedlich sein dürften. Daher werden nachfolgend beide Ausprägungen einzeln behandelt.

#### 11.3.1 Das autonome Privatfahrzeug

Diese Ausprägung beschreibt im Kern die Übertragung von Fahraufgaben auf Automaten im unimodalen Individualverkehr. Sie greift Aspekte der in Kap. 2 dargestellten Anwendungsfälle AutobahnpiLOT, Vollautomat mit Verfügbarkeitsfahrer und Valet-Parken auf.

Dieser Fall geht davon aus, dass die zukünftige Nutzung mit der heutigen Pkw-Nutzung weitgehend übereinstimmt. Abgesehen von den veränderten Eigenschaften der eingesetzten Technologie werden keine Veränderungen angenommen. Nach wie vor ist der Pkw in individuellem Besitz. Es werden keine Annahmen zu Änderungen des Modalwahl- und Zielwahlverhaltens getroffen. Allerdings gibt es Änderungen gegenüber der derzeitigen Nutzung des Fahrzeugs. Zum einen ermöglicht autonomes Fahren andere Aktivitäten wäh-



rend der Fahrt: Vormalige Fahrer können nun – beispielsweise – auf ihrem Laptop arbeiten, essen, ein Buch lesen, einen Film anschauen oder Freunde anrufen [14]. Zum anderen verändern sich die Zugangssituation und die Abgangssituation. Während der Pkw heutzutage entweder direkt vom Wohnort zum Zielort gefahren wird bzw. der Nutzer vor Fahrtantritt das Fahrzeug aufsucht und nach Fahrtende die Strecke vom Parkplatz/-ort zum Ziel zurücklegt, wird unter dem Einfluss des autonomen Fahrens dieser Zu- und Abgangsweg durch einen Vor- bzw. Nachlauf des Fahrzeugs ersetzt. Der Fahrerroboter manövriert das Fahrzeug von der ursprünglichen Parkposition zum Ort des Halters/Nutzers und nach Erreichen des Zielorts zu einer zugewiesenen Parkposition.

Die denkbaren Wirkungen bzw. Veränderungen durch den Einsatz eines autonomen Fahrzeugs auf die Stadtstruktur umfassen zum einen den benötigten Parkraum für Fahrzeuge am Wohnort sowie am Zielort. Zum anderen wird eine Veränderung der Attraktivität von Standorten als Wohnstandort von Haushalten erwartet, einen Attraktivitätswandel wird es aber auch bei Standorten geben, die Ziele für alltägliche Aktivitäten wie Einkaufen oder Freizeit sind. Hinzu kommt, dass sich mit dem Einsatz des autonomen Fahrzeugs der Flächenbedarf für den fließenden Verkehr verändert. Auf diese drei Aspekte wird nachfolgend näher eingegangen.

#### 11.3.1.1 Veränderung des benötigten Parkraums

Die zu erwartenden Veränderungen des Parkraumbedarfs für Fahrzeuge am Wohnort sind insgesamt als gering einzuschätzen, unterscheiden sich allerdings abhängig von den Eigenschaften der Siedlungsstruktur. In Einfamilienhaus-Wohnsiedlungen, in denen sich der Stellplatz auf dem Wohngrundstück befindet, ist keine Veränderung zu erwarten. Hier wird der verfügbare Parkplatz lediglich durch ein anderes (autonomes) Fahrzeug belegt. In Gebieten hoher Dichte, wie beispielsweise in innerstädtischen Bereichen, ist von der Entwicklung bzw. Entstehung von wohnquartiersbezogenen Parkzonen oder Sammelgaragen auszugehen. Denn nur so kann sichergestellt werden, dass das autonom parkende Fahrzeug auch einen Platz im definierten Einzugsbereich des Wohnorts findet.

Weiterreichende Wirkungen auf den Parkraum durch den Einsatz autonomer Fahrzeuge sind am Zielort eines Weges denkbar, der nicht der Wohnort des Nutzers ist. Dies betrifft beispielsweise Einkaufswege, Wege zum Zweck der Erholung oder auch Arbeitswege. Autonome Fahrzeuge wären in der Lage, die Passagiere am Zielort abzusetzen und sich dann auf einem zugewiesenen Parkplatz oder auch in einer Sammelgarage eigenständig zu parken. Auch hier ist davon auszugehen, dass die entsprechenden Parkraumkapazitäten bereitgestellt werden, die dem Fahrzeug das Auffinden eines Parkplatzes sicher und verlässlich ermöglichen. Diese Anwendung autonomen Fahrens, bei der das Fahrzeug den Nutzer am Zielort absetzt und sich anschließend autonom parkt, dürfte einerseits mit einer höheren Akzeptanz bei Nutzern einhergehen, bestimmte Ziele mit dem Pkw aufzusuchen. Andererseits dürften sich erhebliche Effekte bezüglich der Bereitstellung und Bewirtschaftung von Parkraum ergeben. Insbesondere in Gebieten hoher Nutzungsdichte ist davon auszugehen, dass eine Bündelung des Parkraumangebots in Form von Sammelgaragen erfolgt.

Die Möglichkeit zur Einsparung von Fläche wird als ein wesentliches Argument für den Einsatz automatischer Parksysteme genannt, wobei die günstige Flächenausnutzung in erster Linie durch den Ersatz von Rampen und Fahrgassen durch Fördervorrichtungen sowie die Verringerung der Geschosshöhen erreicht wird, aber auch durch das dichte Einparken [14, 15]. Bei Einsatz des Parkroboters gehen die Entwickler von bis zu 60 Prozent mehr Parkplätzen auf gleicher Fläche aus [16].

Die effizientere Nutzung von Flächen für das Parken ist insbesondere aus Kostengesichtspunkten attraktiv [16, 17, 18]. Die für ein Bauvorhaben zu errichtenden Stellplätze haben einen hohen Flächenbedarf und stellen, vor allem wenn die Stellplätze nicht ebenerdig errichtet werden, einen nicht unerheblichen Anteil an den Kosten der Gesamtinvestition dar. Es gibt bereits erste Projekte, die das Parken in Parkhäusern mit autonomen Fahrzeugen testen [19, 20]. Der Fahrer übergibt das Fahrzeug am Eingang des Parkhauses. Die Parkfunktion wird mithilfe einer Smartphone-App aktiviert. Über WLAN erhält das Auto die Routendaten vom Zentralrechner im Parkhaus zum nächsten freien Parkplatz und fährt autonom dorthin. Als ein Vorbild können hierfür bereits heute existierende automatische Parksysteme dienen, bei denen abgesehen von der Ein- und Ausfahrt in einer Übergabekabine alle notwendigen Fahrzeugbewegungen automatisch über Fördervorrichtungen bzw. Verschiebeeinrichtungen realisiert werden, oder mit eigens entwickelten Parkrobotern, wie sie beispielsweise am Flughafen Düsseldorf bereits im Einsatz sind [16].

Wie erwähnt, dürfte sich die Restrukturierung und mögliche Konzentration von Parkflächen nicht flächendeckend durchsetzen, sondern vorrangig auf Gebiete beschränken, die als Ziel besonders attraktiv sind und deren Kosten für die Erstellung erforderlicher Parkflächen und damit die Anreize für platzsparende Lösungen besonders hoch sind (Baulandpreise, Flächenknappheit und damit Bedarf an mehrgeschossigen Lösungen). Hierzu zählen hoch verdichtete innerstädtische Dienstleistungs- und Einkaufszentren oder auch neue Gewerbegebiete mit hoher Zahl an Beschäftigten. Hinzu kommen Mobilitätsknoten – oft auch mit dem englischen Begriff *Hub* bezeichnet – wie Flughäfen oder Bahnhöfe, an denen neben den vorherigen Kriterien auch sichere Lösungen für das längere Einstellen von Fahrzeugen gefordert sind. Inwieweit sich im Zuge der Automatisierung die Kosten für das Parken insgesamt verändern dürften, ist nicht abzuschätzen. Einerseits kann das Absetzen von Passagieren am Zielort und anschließendes Parken an anderer Stelle im Stadtgebiet (mit etwas niedrigerem Nutzungsdruck und damit günstiger) Kosten sparen [21, 22]). Andererseits entstehen mit dem Umbau des Parkraumbangebots für autonomes Fahren wiederum Kosten.

### 11.3.1.2 Veränderung der Attraktivität von (Wohn-)Standorten

Mit der Verfügbarkeit autonomer Fahrzeuge sind auch Effekte auf die Art der Flächennutzung denkbar. Einige Studien weisen auf den Zusammenhang einer steigenden Attraktivität von Wohngebieten am Stadtrand hin [2, 22, 23]. Nach dieser Argumentation kann die Verfügbarkeit eines autonomen Fahrzeugs dazu führen, dass Haushalte im Grünen gelegene, kostengünstigere, aber weiter vom Zentrum der Stadt entfernt gelegene Standorte wählen, da das autonome Fahrzeug die Standortnachteile (größere Entfernung) kompen-

siert. Eine Folge wäre die Entstehung von neuen Siedlungsgebieten vergleichsweise geringer Dichte und geringer Nutzungsmischung analog zur Suburbanisierung in der zweiten Hälfte des vergangenen Jahrhunderts. Dort haben Motorisierung, Infrastruktur und die planerisch-politischen Leitbilder der Nutzungstrennung und der aufgelockerten Stadt sowie die Entscheidung von Haushalten für die Ansiedlung im Grünen eine bis heute prägende Siedlungsstruktur geschaffen [24].

Generell ist bekannt, dass die Wohnstandortwahl von Berufstätigen durch Faktoren wie Wohn- und Wohnumfeldqualität weitaus stärker beeinflusst wird als durch den Wunsch nach Nähe zum Arbeitsplatz [25]. Erkennbar wird dies durch eine vergleichsweise hohe Bedeutung des Arbeitspendelns. Etwa 60 Prozent aller sozialversicherungspflichtig Beschäftigten in Deutschland, das sind rund 17 Millionen Personen, arbeiten nicht in der Gemeinde, in der sie wohnen. Um zum Arbeitsort zu gelangen, benötigen Beschäftigte durchschnittlich ca. eine halbe Stunde pro Weg. Dabei dominiert die Pkw-Nutzung, indem etwa 66 Prozent der Wege mit dem Auto zurückgelegt werden [26], in den USA sind es sogar 86 Prozent [27]. Auf Basis von Datensätzen zur Erwerbstätigkeit und Beschäftigung sowie zu regionalen Berufsverflechtungen haben Guth et al. [25] herausgefunden, dass in den Agglomerationsräumen in Deutschland der Anteil der gemeindeübergreifenden Berufspendelwege und die zurückgelegten Distanzen in den letzten Jahrzehnten angestiegen sind.

Autonomes Fahren könnte diesen Trend und die Bereitschaft zur Inkaufnahme längerer Pendel-Arbeitswege weiter fördern. Zum einen wird angenommen, dass sich mit dem autonomen Fahren eine Steigerung des Fahrkomforts verbindet (z. B. [14]). Die Fahrzeit muss nicht mehr für die aufmerksame und verantwortungsvolle Fahrzeugführung aufgewendet werden, sondern kann anderen Aktivitäten dienen. Mobilität wird nicht notwendigerweise als Zwang oder Zeitverlust empfunden. Des Weiteren lassen sich Fahrzeiten verkürzen. Im Zusammenhang mit dem autonomen Fahren bestehen hohe Erwartungen an eine allgemein effizientere Abwicklung des fließenden und ruhenden Verkehrs [2, 22, 28]. Autonome Fahrzeuge können ihre Fahrweise miteinander harmonisieren, beispielsweise bei Beschleunigungs- und Bremsvorgängen, und damit Wegezeiten reduzieren. Ebenso werden nahezu keine Verzögerungen mehr an Kreuzungen vorausgesagt [14]. Auch beim Parksuchverkehr werden deutliche Reduzierungen des Zeitbedarfs erwartet, bedingt durch das Absetzen von Passagieren. Die Fahrt mit dem autonomen Fahrzeug kann insgesamt prognostizierbarer und zeitlich verlässlicher geplant werden. Dies ergibt sich aus nahezu konstanten Geschwindigkeiten und einer verlässlichen und vorhersagbaren Route vom Ausgangspunkt zum Ziel.

Verbesserter Fahrkomfort, verringerte Wegezeiten und höhere Verlässlichkeit von Reisezeiten sind relevante Faktoren für die Abwägung von Haushalten, weiter entfernte Arbeitsplätze oder sonstige Ziele wie Versorgungs- und Bildungseinrichtungen zugunsten anderer Kriterien eines Wohnstandorts wie die Bezahlbarkeit des Wohnraums oder die landschaftliche Attraktivität des Umfeldes. Besonders für Berufspendler dürfte sich mit der Verfügbarkeit eines autonomen Fahrzeugs und der prognostizierten Effekte die Entscheidungsgrundlage verändern. Insbesondere Wegezeiten stellen eine hohe Zusatzbelastung für

Pendler dar [29]. Dies wird dort noch verstärkt, wo die Zeitdauer und damit das Erreichen des Ziels schwer kalkulierbar werden. Psychologische Studien [30] zeigen, dass Zeitverluste, die der Verkehrsteilnehmer nicht selbst kontrollieren kann – beispielsweise durch Stau – in besonders hohem Maße für Stress verantwortlich sind.

### 11.3.1.3 Flächenbedarf für den fließenden Verkehr

Die genannten Vorteile des autonomen Fahrens lassen auch erwarten, dass Kapazitäten von Verkehrswegen frei werden. Aufeinander abgestimmte Beschleunigungs- und Bremsvorgänge und die dichtere Fahrzeugfolge (das sogenannte *Platooning*) ermöglichen eine Reduzierung des Straßenraums zur Abwicklung des Fahrvorgangs [30]. Dadurch wird eine deutlich höhere Fahrzeugdichte bezogen auf die Fläche des Straßenraums erwartet [30, 31], wobei unterschiedliche Aussagen zum Umfang dieser Kapazitätssteigerung existieren. So geht Fernandez von bis zu 500 Prozent aus [31]. Brownell schätzt gut 250 Prozent für Autobahnen und etwa 180 Prozent für innerstädtische Straßen [32]. Dies bedeutet, dass die für den fließenden Verkehr erforderliche Fläche reduziert werden könnte, beispielsweise durch die Reduktion von Fahrspuren. Auch die Breite von Fahrstreifen könnte, aufgrund des veränderten Fahrzeugverhaltens autonom fahrender Fahrzeuge, gegenüber gegenwärtigen Maßen reduziert werden (s. Kap. 16). Aufgrund der Reduzierung des Flächenbedarfs durch den fließenden Verkehr könnten andere Nutzungen gefördert werden, wie beispielsweise Fahrstreifen für Fahrräder oder Fußwege. Allerdings weisen verschiedene Autoren darauf hin, dass diese Effekte erst bei vollständiger Automatisierung zum Tragen kommen [22].

Die Verdichtung des fließenden Verkehrs könnte aber auch in anderer Weise Auswirkungen auf Verkehrsteilnehmer wie Fußgänger und Radfahrer nach sich ziehen. So dürfte die Trennungswirkung zunehmen und das Queren von Fahrspuren unter Bedingungen eines dicht fließenden Verkehrs erschwert werden. Um die Vorteile des autonomen Fahrens für den Verkehrsfluss zu gewährleisten und gleichzeitig die „Durchlässigkeit“ für den Fuß- und Radverkehr sicherzustellen, wäre die Anlage von kreuzungsfreien Querungen wie Über- oder Unterführungen eine notwendige Konsequenz.

### 11.3.2 Das autonome Taxi als integrierter Teil des öffentlichen Verkehrs

Eine zweite Entwicklung, die weitaus prominenter in den dargestellten Szenarien thematisiert wird, ist die Entstehung eines neuen Modells städtischer Mobilität in Form autonomer Taxiflotten. Sie greift Aspekte des in Kap. 2 beschriebenen Anwendungsfalls „Vehicle-on-Demand“ auf. In einem solchen System operieren kostengünstige autonome Taxis nicht auf festen Routen und nach starren Fahrplänen, sondern bedarfsorientiert und flexibel. Sie sind im permanenten Fahrbetrieb und verkehren in einem stadtweiten, dichten Netz von Stationen. Die Funktionsweise ähnelt dem Anruf-Sammeltaxi. Das Stadtgebiet ist in Zellen aufgeteilt. Zu jeder Zelle gehört eine oder eine Reihe von zentralen Aus- und Zustiegsstationen, sogenannte *central transit points*. Denkbar ist, dass Taxis mit dem schienen-

gebundenen öffentlichen Verkehrsangebot (ÖV) verknüpft sind bzw. kombiniert werden können. Die Taxis übernehmen die Zubringer- bzw. Feinverteilungsfunktionen zu den Stationen des schienengebundenen ÖV und nehmen dort Fahrgäste auf, während der leistungsfähigere und möglicherweise schnellere ÖV die langen Streckenabschnitte übernimmt. Der Einsatz eines automatisierten Taxi-Netzwerks ist als Konzept bereits beschrieben und modelliert [32, 33, 34]). Es könnte zu einem grundlegenden Wandel des öffentlichen Nahverkehrs führen und das Problem der letzten Meile von Hochgeschwindigkeitsbahnen lösen [23]. Es beinhaltet den Wegfall klassischer Bus- und Tram-Haltestationen. Der Betrieb der Taxis könnte öffentlich oder privat erfolgen.

### 11.3.2.1 Verkehrs- und Parkflächen des öffentlichen Raums

Die Auswirkungen eines öffentlichen Verkehrssystems mit autonomen Fahrzeugen auf Stadtstrukturen dürften sehr weitreichend sein. Der Einsatz autonomer Fahrzeuge könnte die Anzahl von Parkplätzen in Stadtzentren deutlich reduzieren. Denn nach Absetzen von Passagieren müsste sich das Fahrzeug nicht zu einer entfernteren Station zum Parken navigieren, sondern würde einfach zum nächsten Passagier weiterfahren. Damit sind mehr Fahrzeuge im kontinuierlichen Betrieb, und der Stellplatzbedarf sinkt. Erforderlich ist allerdings die Einrichtung dezentraler Depots für Reinigung, Wartung, Tanken/Laden oder Reparatur der eingesetzten Fahrzeuge.

Der permanent verfügbare Einsatz einer solchen Taxiflotte dürfte *car sharing* und möglicherweise auch dynamisches *ride sharing* erhöhen, da es spontanes und minuten- bzw. entfernungsgenaues Mieten eines Fahrzeugs für die Tür-zu-Tür-Fahrt ermöglicht [14]. Es könnte als eine konsequente Weiterentwicklung bereits heute existierender flexibler Carsharing-Geschäftsmodelle gesehen werden, welche diese Eigenschaften bereits besitzen (Car2go, City Car Club, DriveNow, Zipcar). Vor diesem Hintergrund könnte davon ausgegangen werden, dass ein solches System Fahrzeugbesitz und -nutzung spürbar verändern wird (s. Kap. 9). Auch eine Steigerung des Besetzungsgrades der Pkw-Nutzung ist denkbar [22].

Eine Folge könnte ein Rückgang des Pkw-Besitzes in Haushalten sein, die im Einzugsgebiet eines solchen *Mobility-on-demand*-Angebots leben. So könnten sich US-Amerikaner derzeit vorstellen, ihren Zweitwagen bei Verfügbarkeit eines solchen Systems mit Direktabholung vor der Haustür abzuschaffen [28]. Durch die Veränderung der Pkw-Besitzraten würde sich der Stellplatzbedarf verändern. Dies könnte so weit gehen, dass der ruhende Verkehr weitgehend zugunsten multifunktionaler Wegflächen entfällt. Diese Flächen könnten breiter als bisherige sein und unterteilt in einen befahrbaren Raum für Fahrräder und möglicherweise elektrisch unterstützte Mikrofahrzeuge mit Geschwindigkeiten bis etwa 30 km/h und in eine Fahrbahn für schwerere und schnellere Fahrzeuge.

Eine weitere Veränderung der Gestalt städtischen Raums ist die Einrichtung von Aus- und Zustiegsstationen, welche die Ausprägung von Mobilitätsknoten weiter fördert, insbesondere solche mit Umstiegsmöglichkeiten zum sonstigen ÖV. Über die Umgestaltung dieser Räume zum Halten, zur Aufnahme von Passagieren oder zum Kurzparken hinaus

sind Nutzungsänderungen zu erwarten, wie beispielsweise die Zunahme und Konzentration von Dienstleistungs- und Einkaufsgelegenheiten an den Knoten.

Durch die weitreichende Umgestaltung des öffentlichen Verkehrssystems sind auch Auswirkungen auf die komplementären ÖV-Infrastrukturen und -nutzungen denkbar. Ein Umstieg von Nutzern vom eigenen Pkw auf ein autonomes Taxiangebot, welches mit einem leistungsfähigen schienengebundenen Liniennetz verknüpft ist, würde das Passagieraufkommen auf diesen Strecken stärken und sehr wahrscheinlich Kapazitätsanpassungen nach sich ziehen müssen.

---

## **11.4 Wesentliche Treiber für die Entwicklung eines Verkehrssystems mit automatisierten Fahrzeugen in Städten**

In den vorangegangenen Abschn. 11.2 und 11.3 wurden vorhandene Szenarien analysiert und anhand unterschiedlicher Ausprägungen die Wirkungen eines durch autonomes Fahren beeinflussten Verkehrssystems auf die Stadtstruktur diskutiert. Anknüpfend daran hinterfragt dieser Abschnitt, welche Einflussfaktoren besonders bedeutsam für die Entwicklung eines Verkehrssystems mit automatisierten Fahrzeugen in Städten sein könnten.

Die Diskussion der Szenarien zeigt zunächst die herausragende Bedeutung technologischer Innovationen, in deren Zusammenhang autonomes Fahren eine zunehmende Rolle im Verkehrssystem erlangt. Fortschritte und neue Entwicklungen im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnologie, der elektronischen und digitalen Infrastruktur, des Datenmanagements und der künstlichen Intelligenz sind wesentliche Treiber dieses Trends, wobei die Automatisierung der Verkehrsmittel als Teil einer „umfassenderen“ Automatisierung von Prozessen in Städten gedeutet werden kann. Beispiele hierfür sind die Automatisierung des Parkens oder des Energie- und Gebäudemanagements.

Damit einhergehend zeigt sich, welche hohen Erwartungen an die Steuerungskapazitäten des Staates mit der Entwicklung eines Verkehrssystems mit autonomen Fahrzeugen verbunden sind. Der Staat kooperiert mit dem Privatsektor, um die erforderlichen Technologien zu entwickeln. Er flankiert dies durch eine neue Gesetzgebung bezüglich Zulassung, Haftungsrecht und Versicherungswesen sowie durch ein Akzeptanz schaffendes Konzept zu den Themen Datenmanagement und Standardisierung von Daten.

Hinsichtlich der Akzeptanz autonomen Fahrens durch die Bevölkerung wird deutlich, dass eine Reihe denkbarer Faktoren positiven Einfluss nehmen könnten. Zum einen verbindet sich mit dem autonomen Fahren der gesellschaftliche Nutzen eines effizienteren und umweltschonenderen Verkehrssystems. Zum anderen ist es durchaus vorstellbar, dass die Akzeptanz von privaten Nutzern und wirtschaftlichen Akteuren aufgrund der individuellen Vorteile für Lebensstil oder Handel in den kommenden Jahrzehnten steigen wird, insbesondere unter Annahme einer sichtbaren Technologie- und Akzeptanzförderung durch den Staat.

Ein weiterer Faktor, der die Automatisierung positiv beeinflussen dürfte, ist die Perspektive einer kosteneffizienteren Nutzung und Aufwertung städtischen Raums. Ein Bei-

spiel ist das Parken, für das eine Automatisierung deutliche Kostenersparnisse für die Erstellung von Parkflächen und aufgrund von Reduzierung des Flächenbedarfs Potenziale für Umwandlung in andere Nutzungen verspricht. Aber auch Flächen am Stadtrand oder im Umland werden im Zuge einer denkbaren Neubewertung von Standortwahlkriterien und steigender Attraktivität als Wohnstandort möglicherweise an Wert gewinnen.

Allerdings darf nicht darüber hinweggesehen werden, dass den genannten Faktoren große Unsicherheiten gegenüberstehen. Zunächst ist, angesichts grundsätzlicher rechtlicher und ethischer Fragen (s. Kap. 25 und Kap. 4), überhaupt nicht absehbar, in welcher Geschwindigkeit und in welcher Ausprägung sich städtische Verkehrssysteme mit autonomen Fahrzeugen entwickeln werden.

Auch die Folgen für den Verkehr und damit die Stadtstruktur sind damit derzeit noch nicht verlässlich prognostizierbar. Mit der Integration autonomen Fahrens als Teil eines kollektiven, öffentlichen Verkehrssystems dürften sich Carsharing und der Rückgang des Pkw-Besitzes stärker entwickeln. Eine verstärkte Akzeptanz und Nutzung des „eigenen“ autonomen Pkw dürfte die Perspektiven für den motorisierten Individualverkehr stärken. Insbesondere in letzterem Fall stellt sich die Frage nach möglichen „Rebound-Effekten“. Durch Zeiteinsparungen und geringere Nutzungskosten kann es zu einem höheren Konsum von Mobilität und zur Zunahme der Fahrleistung kommen [22]. Mit einer Zunahme autonomer Fahrzeuge wäre unter diesen Umständen eine Kompensation von Kapazitätsgewinnen die Folge.

Allerdings ist auch die Frage danach, wie sich die Höhe der zusätzlichen Kosten für die Nutzung autonomer Fahrzeuge entwickeln dürfte, derzeit noch nicht beantwortet. Die in diesem Kapitel analysierten Szenarien gehen auf diesen Punkt nicht plausibel ein, sondern argumentieren lediglich mit der Annahme, dass die Mobilität auch in der Zukunft bezahlbar sein wird. Kalkulationen zusätzlicher Kosten für die Ausrüstung von Pkw gehen jedoch davon aus, dass sich sowohl die Anschaffungs- als auch die Unterhaltungskosten zunächst deutlich erhöhen dürften [22, 28]). Hinzu kämen Folgekosten für Kommunen für die Anpassung von Verkehrsinfrastrukturen sowie für die Erschließung neuer Siedlungsgebiete in dem Fall, dass die Attraktivität von suburbanen Standorten in der Tat zunehmen würde.

Aus all diesen Aspekten folgt eine hohe Planungsunsicherheit für kommunale und regionale Akteure der Politik, der Verwaltungen, Verkehrsbetreiber sowie der Immobilienwirtschaft. Insbesondere die Anpassung von Infrastrukturen des Verkehrs und der Siedlungsentwicklung erfordert eine langfristige Herangehensweise einschließlich der entsprechenden Regulation und Finanzierung. Veränderungen der Raumstrukturen im Zuge autonomen Fahrens sind erst dann zu erwarten, wenn die meisten Fahrzeuge auf der Straße automatisiert sind. Solange dies nicht der Fall ist, dürften Verkehrsdichten nicht signifikant steigen, die Planbarkeit von Trips sich nicht verbessern, der Parkbedarf sich nicht wesentlich reduzieren und können Straßenquerschnitte nicht verringert werden. Damit fehlen zumindest den Akteuren kommunaler Verkehrs- und Stadtplanung derzeit noch wichtige Entscheidungs- und Handlungsgrundlagen nicht zuletzt auch vor dem Hintergrund fehlender Klarheit, in welcher Form sich autonomes Fahren mittel- bis langfristig durchsetzen wird.

## 11.5 Zusammenfassung und Ausblick

Das Kernanliegen dieses Beitrags ist es, mögliche stadtstrukturelle Entwicklungen unter dem Einfluss eines Verkehrssystems mit autonomen Fahrzeugen auszuloten und abzuschätzen, in welcher Weise politische und ökonomische Rahmenbedingungen diese Entwicklungen beeinflussen können. Auf Basis verfügbarer Szenarien bzw. Visionen zur „Stadt von morgen“ und deren Vorstellungen bezüglich einer Integration von Verkehrssystemen mit autonomen Fahrzeugen zeigt er auf, dass unterschiedliche Entwicklungen denkbar sind: zum einen das autonome Privatfahrzeug, welches je nach Szenario „bordautonom“ durch einen Autopiloten gesteuert wird oder durch Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation in den Verkehrsfluss eingebunden ist, oder zum anderen das autonome Fahren als integrierter Teil des öffentlichen Verkehrsangebots.

Abhängig von diesen unterschiedlichen Ausprägungen haben autonome Verkehrsmittel das Potenzial, das Verkehrssystem in ganz unterschiedlicher Weise zu verändern. Ihre Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten werden auch Auswirkungen auf Entscheidungen zur Entwicklung von Flächennutzungen und Raumstrukturen haben. Einflussbereiche umfassen beispielsweise den Bedarf und die Organisation des Parkens sowie die Attraktivität von Räumen als Wohnstandort, Einkaufs- oder Arbeitsziel. Darüber hinaus haben autonome Fahrzeuge das Potenzial, derzeit für Verkehrs- und Parkflächen genutzte Flächen in andere Nutzungen (sei es für andere verkehrliche Nutzungen wie Rad- oder Fußverkehr oder aber bauliche Nutzungen) zu überführen. Welche Veränderungen sich konkret vollziehen könnten, hängt dabei stark davon ab, in welche Richtung sich autonomes Fahren entwickeln wird.

### 11.5.1 Aspekte in der Diskussion um automatisiertes Fahren aus Sicht der Stadtentwicklung und Stadtplanung

Die Diskussion macht deutlich, dass eine Reihe möglicher Wirkungen autonomer Fahrzeuge auf Raumstrukturen existieren, die als Kriterien für die Entscheidung des Besitzes und der Nutzung autonomer Fahrzeuge relevant sind. Die Möglichkeit von Haushalten, ihre „suburbanen“ Präferenzen leichter zu realisieren, ist ein Beispiel hierfür. Entscheidungszusammenhänge zwischen längerfristigen (Standortwahl) und alltäglichen Mobilitätsentscheidungen (Wahl von Zielen und Verkehrsmitteln) sollten in die Diskussion um das autonome Fahren eingehen. Hinzu kommt, dass diesen individuellen Kriterien relevante Aspekte gegenüberstehen, die sich auf den gesellschaftlichen Nutzen einer Automatisierung des Verkehrssystems beziehen. Dies betrifft beispielsweise die Folgekosten für die Erschließung neuer Siedlungsgebiete am Stadtrand als Folge geänderter Attraktivität solcher Gebiete. Inwieweit sich diese Zusammenhänge mit der Einführung autonomen Fahrens tatsächlich realisieren und wie die Folgen zu bewerten sind, sollte verstanden und in der Diskussion um das automatisierte Fahren zwingend werden.



Ein zweiter Aspekt betrifft die Erkenntnis, dass im Zuge der Veränderung des Verkehrssystems neben möglichen Änderungen von Flächennutzungen eine weitreichende Transformation hin zu neuen Infrastrukturen und umgestalteten Verkehrsflächen denkbar ist. Diese müssen die Entwicklungen der Fahrmuster und Verhalten von automatisierten Fahrzeugen und nicht automatisierten Fahrzeugen, aber auch andere Modi berücksichtigen. All das ist eine langfristige Aufgabe. Denn Veränderungen der Raumstrukturen im Zuge autonomen Fahrens sind erst dann zu erwarten, wenn die meisten Fahrzeuge auf der Straße automatisiert sind. Hier sind viele Fragen noch offen. So besteht ein Bedarf zur Analyse, wie autonomes Fahren die langfristigen Pläne zur Gestaltung von Parkflächen, Fahrradspuren, Kreuzungen, Bürgersteigen, Querschnittsgestaltungen von Straßen etc. beeinflussen könnte. Wesentlich für die Diskussion ist die Frage: Wie kann eine sukzessive Transformation hin zu einem Verkehrssystem mit autonomen Fahrzeugen gestaltet werden, und was sind überhaupt plausible Einführungszenarien? Dabei wird nicht nur zu klären sein, wie vorhandene Infrastrukturen graduell „umgebaut“ werden können, sondern wie sich in diesem Zuge die derzeitige Bevorrechtigung und Rollen unterschiedlicher Modi und Verkehrsmittel verändern. Wie beschrieben, ist es vorstellbar, dass mit der Zunahme autonomer Fahrzeuge und der Einrichtung von speziellen Fahrspuren eine Entwicklung hin zu einer stärkeren Funktionstrennung zwischen den verschiedenen Modi einhergeht. Auch die Durchlässigkeit des Straßenraums für andere Verkehrsteilnehmer im Zuge eines dicht fließenden Verkehrs mit autonomen Fahrzeugen dürfte bei dieser Entwicklung verändert werden. Dies wirft die Frage auf, in welcher Form und wie gleichberechtigt die Nutzungsmischung unterschiedlicher Verkehrsmodi unter dem Einfluss autonomen Fahrens zukünftig organisiert werden sollte.

Spätestens hier wird deutlich: Nicht nur Aspekte der Stadtentwicklung sind relevant für die Diskussion um das autonome Fahren. Die Automatisierung des Verkehrssystems ist von großer Relevanz für Stadtplanung und -entwicklung und die hierfür entwickelten Leitbilder und Ziele. Inwieweit und unter welchen Voraussetzungen kann ein Verkehrssystem mit autonomen Fahrzeugen zur Realisierung derzeit gültiger Modelle wie die dichte und kompakte Stadt beitragen? Oder verknüpft sich damit die Aussicht auf die Rückkehr zur autogerechten Stadt? In welcher Beziehung stehen städtebauliche Elemente zur Strukturierung des autonomen Verkehrs zu den Anforderungen einer allenthalben propagierten Fußgänger-, Rad-, und Bahnstadt? Bedarf es unter dem Einfluss des automatisierten Fahrens der Formulierung grundlegend anderer bzw. neuer Leitbilder zur Entwicklung von Städten? Die Diskussion um Antworten auf diese Fragen kann beginnen.

## Literatur

1. Cervero, R., Kockelman, K. (1997): Travel demand and the 3Ds: Density, diversity, and design. In: Transportation Research Part D: Transport and Environment, Volume 2, Issue 3, September 1997, Pages 199–219. DOI: 10.1016/S1361-9209(97)00009-6
2. Apel, D. (2003): Der Einfluss der Verkehrsmittel auf Städtebau und Stadtstruktur. In: Bracher, T.; Haag, M.; Holzapfel, H.; Kiepe, F.; Lehmbruck, M.; Reutter, U. (Hrsg.): HKV – Handbuch der kommunalen Verkehrsplanung
3. RAND Corporation (2014): Autonomous Vehicle Technology. A Guide for Policymakers. URL: [http://www.rand.org/pubs/research\\_reports/RR443-1.html](http://www.rand.org/pubs/research_reports/RR443-1.html); Zugriff am 2. Juli 2014
4. Wilson, I. H. (1978): Scenarios. In: Fowles J. und Fowles, R. B. (Hrsg.): Handbook of Futures Research. Greenwood Pub Group Inc, Westport und London, S. 225–247
5. von Reibnitz, U. (1992): Szenario-Technik. Instrumente für die unternehmerische und persönliche Erfolgsplanung. Gabler Verlag, Wiesbaden
6. Steinmüller, K. H. (1997): Grundlagen und Methoden der Zukunftsforschung – Szenarien, Delphi, Technikvorausschau. Werkstattbericht 21. Sekretariat für Zukunftsforschung. Gelenkirchen. URL: <http://steinmuller.de/media/pdf/WB%2021%20Grundlagen.pdf>; Zugriff am 14. April 2014
7. Foresight Directorate (2006): Intelligent infrastructure futures. The Scenarios – Towards 2055 URL: <http://www.bis.gov.uk/assets/foresight/docs/intelligent-infrastructure-systems/the-scenarios-2055.pdf>; Zugriff am 12. April 2014
8. Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung der Angewandten Forschung e.V. (2012): Visionen zur Morgenstadt. Leitgedanken für Forschung und Entwicklung von Systeminnovationen für nachhaltige und lebenswerte Städte der Zukunft. URL: [http://www.morgenstadt.de/de/\\_jcr\\_content/stage/linklistPar/download/file.res/Fraunhofer\\_Visionen%20zur%20Morgenstadt\\_050212.pdf](http://www.morgenstadt.de/de/_jcr_content/stage/linklistPar/download/file.res/Fraunhofer_Visionen%20zur%20Morgenstadt_050212.pdf); Zugriff am 14. April 2014
9. Stadt Wien (Magistrat 18 der Stadtentwicklung und Stadtplanung) (2012): smart city Wien – towards a sustainable development of the city (= Blue Globe ReportSmartCities #1/2012) URL: <http://www.smartcities.at/assets/Projektberichte/Endbericht-Langfassung/BGR01-2012-K11NE2F00030-Wien-v1.0.pdf>; Zugriff am 12. April 2014
10. Bundesministerium für Bildung und Forschung (n.D.): Morgenstadt – eine Antwort auf den Klimawandel. URL: [http://www.bmbf.de/pubRD/morgenstadt\(1\).pdf](http://www.bmbf.de/pubRD/morgenstadt(1).pdf); Zugriff am 2. Mai 2014
11. Promotorengruppe Mobilität der Promotorengruppe Mobilität Wirtschaft – Wissenschaft (2013): Abschlussbericht der Promotorengruppe Mobilität. URL: [http://www.forschungsunion.de/pdf/mobilitaet\\_bericht\\_2013.pdf](http://www.forschungsunion.de/pdf/mobilitaet_bericht_2013.pdf); Zugriff am 4. April 2014
12. Forum for the Future (2010): Megacities on the move. Your guide to the future of sustainable urban mobility in 2040. URL: [http://www.forumforthefuture.org/sites/default/files/images/Forum/Projects/Megacities/megacities\\_full\\_report.pdf](http://www.forumforthefuture.org/sites/default/files/images/Forum/Projects/Megacities/megacities_full_report.pdf); Zugriff am 12. April 2014
13. Angel, S., Parent, J., Civco, D. L., Blei, A. M. (2011): Making Room for a Planet of Cities. Lincoln Institute of Land Policy. Cambridge, MA
14. Fagnant, D. J., Kockelman, K. M. (2013): Preparing a Nation for Autonomous Vehicles: Opportunities, barriers and Policy Recommendations. Eno Foundation. URL: [http://www.eno-trans.org/wp-content/uploads/wp-content/uploads/wp-content/uploads/wp-content/uploads/wp-content/uploads/wp-content/uploads/wp-content/uploads/wp-content/uploads/wp-content/uploads/AV-paper.pdf](http://www.eno-trans.org/wp-content/uploads/wp-content/uploads/wp-content/uploads/wp-content/uploads/wp-content/uploads/wp-content/uploads/wp-content/uploads/wp-content/uploads/wp-content/uploads/wp-content/uploads/wp-content/uploads/AV-paper.pdf); Zugriff am 12. April 2014
15. Irscher, I. (n.D.): Benutzerfreundliche automatische Parksysteime – Besondere Anforderungen – Planung – Einsatz. URL: [www.givt.de/index.php/de/component/jdownloads/finish/4/22](http://www.givt.de/index.php/de/component/jdownloads/finish/4/22); Zugriff am 14. April 2014
16. Kowalewski, S. (2014): Überlassen Sie das Parken Ray. Deutschlandradio Kultur. URL: [http://www.deutschlandradiokultur.de/technologie-ueberlassen-sie-das-parken-ray.2165.de.html?dram:article\\_id=290092](http://www.deutschlandradiokultur.de/technologie-ueberlassen-sie-das-parken-ray.2165.de.html?dram:article_id=290092); Zugriff am 2. Mai 2014

17. Mitchell, W.J., Boronni-Bird, E., Burns, L.D. (2010): Reinventing the Automobile. Personal Urban Mobility for the 21<sup>st</sup> Century. The MIT Press. Cambridge, MA
18. LEG Stadtentwicklung GMBH (2008): Mobilitätshandbuch Zukunftsstandort Phoenix West. Dortmund. URL: [http://www.mobilitaetsmanagement.nrw.de/cms1/download/mobilitaetshandbuch\\_phoenix.pdf](http://www.mobilitaetsmanagement.nrw.de/cms1/download/mobilitaetshandbuch_phoenix.pdf); Zugriff am 5. Mai 2014
19. Continental AG (2014): Der Fahrer entscheidet, das Auto übernimmt. URL: [http://www.conti-online.com/www/automotive\\_de\\_de/themes/passenger\\_cars/automated\\_driving](http://www.conti-online.com/www/automotive_de_de/themes/passenger_cars/automated_driving)
20. Audi (2012): Automatisch ins Parkhaus. URL: <http://blog.audi.de/2012/09/21/automatisch-ins-parkhaus/>; Zugriff am 2. Mai 2014
21. Litman, T. (2014): Ready or waiting. Traffic Technology International. January. 37–42. URL: <http://www.trafficechnologytoday.com>; Zugriff am 2. Mai 2014
22. Litman, T. (2014): Autonomous Vehicle Implementation Prediction. Implications for Transport Planning. URL: <http://www.vtpi.org/avip.pdf>; Zugriff am 14. Juni 2014
23. Le Vine, S., Polack, J. (2014): Automated Cars: A smooth ride ahead? ITC Occasional Paper-Number Five, February 2014. URL: <http://www.theitc.org.uk/docs/114.pdf>; Zugriff am 14. April 2014
24. Angerer, F., Habdler, G. (2008): Integration der Verkehrs- in die Stadtplanung. In: : Steierwald, G.; Künne, H. D. & Vogt, W. (Hrsg.): Stadtverkehrsplanung. Grundlagen, Methoden, Ziele. 2. Auflage, Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. S. 18–28
25. Guth, D., Siedentop, S., Holz-Rau, C. (2012): Erzwungenes oder exzessives Pendeln? Zum Einfluss der Siedlungsstruktur auf den Berufspendelverkehr. In: Raumordnung und Raumforschung (2012) 70, S. 485–499
26. Destatis (Statistisches Bundesamt) (2014): Berufspendler: Infrastruktur wichtiger als Benzinpreis. URL: [https://www.destatis.de/DE/Publikationen/STATmagazin/Arbeitsmarkt/2014\\_05/2014\\_05Pendler.html#Link3](https://www.destatis.de/DE/Publikationen/STATmagazin/Arbeitsmarkt/2014_05/2014_05Pendler.html#Link3); Zugriff am 12. April 2014
27. McKenzie, B. (2014): Modes Less Traveled – Bicycling and Walking to Work in the United States: 2008–2012. American Community Survey Reports. URL: <http://www.census.gov/hhes/commuting/>; Zugriff am 5. April 2014
28. Silberg, G., Wallace, R., Matuszak, G. (2012): Self-Driving Cars: The Next Revolution, KPMG and the Centre for Automotive Research; URL: [www.kpmg.com/Ca/en/IssuesAndInsights/ArticlesPublications/Documents/self-driving-cars-next-revolution.pdf](http://www.kpmg.com/Ca/en/IssuesAndInsights/ArticlesPublications/Documents/self-driving-cars-next-revolution.pdf); Zugriff am 28. April 2014
29. Häfner, S., Rapp, H., Kächele, H. (2012): Psychosoziale Belastungen von Bahnpendlern und was soll man tun? In: Psychotherapeut 2012 (57): S. 343–351
30. Lewis, D. (2004): Commuters suffer extreme stress, in BBC, URL: [http://news.bbc.co.uk/2/hi/uk\\_news/4052861.stm](http://news.bbc.co.uk/2/hi/uk_news/4052861.stm); Zugriff am 4. Mai 2014
31. Fernandes, P. (2012): Platooning With IVC-Enabled Autonomous Vehicles: Strategies to Mitigate Communication Delays, Improve Safety and Traffic Flow. URL: <http://home.isr.uc.pt/~pedro/T-ITS-11-02-0065.pdf>; Zugriff am 2. Mai 2014
32. Brownell, C. K. (2013): Shared Autonomous Taxi Networks: An Analysis of Transportation Demand in NJ and a 21st Century Solution for Congestion. URL: <http://orfe.princeton.edu/~alaink/Theses/2013/Brownell,%20Chris%20Final%20Thesis.pdf>; Zugriff am 2. Mai 2014
33. Brownell, C. K., Kornhauser, A. (2013): Autonomous Taxi Networks: a fleet size and Cost Comparison between two emerging transportation models and the conventional automobile in the state of New Jersey. URL: [http://orfe.princeton.edu/~alaink/TRB'14/TRB'14\\_BrownellPaper\\_0728v2.pdf](http://orfe.princeton.edu/~alaink/TRB'14/TRB'14_BrownellPaper_0728v2.pdf); Zugriff am 14. April 2014
34. Gorton, M. (2008): Using Information Technology to Achieve a Breakthrough in Transportation in New York City. The Open Planning Project. August 2008. URL: <http://www.streetsblog.org/wp-content/pdf/SmartParaTransit.pdf>; Zugriff am 2. Mai 2014

Rita Cyganski

## Inhaltsverzeichnis

<b>12.1 Einleitung</b> .....	242
<b>12.2 Kriterien der Verkehrsmittelwahl</b> .....	243
<b>12.3 Die Verkehrsmittelwahl in angewandten Verkehrsmodellen</b> .....	244
12.3.1 Eine kurze Einführung in die generelle Funktionsweise von Verkehrsnachfragemodellen .....	244
12.3.2 Entscheidungskriterien in angewandten Modellen der Verkehrsmittelwahl .....	246
<b>12.4 Welche Wirkung könnte die Einführung autonomer Fahrzeuge auf unser Verkehrsmittelwahlverhalten zeigen?</b> .....	247
12.4.1 Der Autobahnpilot: ein Pkw mit dem besonderen Etwas für Ausnahmesituationen? .....	248
12.4.2 Valet-Parken – nie mehr einen Parkplatz suchen? .....	248
12.4.3 Bequem und sicher ans Ziel mit einem vollautomatisierten Fahrzeug .....	249
12.4.4 Das Vehicle-on-Demand – Zipcar on Steroids? .....	250
12.4.5 Das Auto der Zukunft: Konkurrenz für das Auto, das Taxi oder die Bahn? .....	251
<b>12.5 Welche Einsatzmöglichkeiten sehen Privatpersonen für autonome Fahrzeuge? Erste Ergebnisse einer Befragung</b> .....	251
12.5.1 Wer kann sich vorstellen, sein bisher bevorzugtes Verkehrsmittel zu ersetzen? . . .	252
12.5.2 Worin sehen die Befragten den spezifischen Vorteil der autonomen Fahrzeuge? . .	255
12.5.3 Was machen wir heute und zukünftig unterwegs? .....	256

---

R. Cyganski (✉)

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Verkehrsforschung, Deutschland

Rita.Cyganski@dlr.de

<b>12.6 Autonome Fahrzeuge in der Nachfragemodellierung: Möglichkeiten und Grenzen einer Integration</b> .....	257
<b>12.7 Zusammenfassung und Ausblick</b> .....	260
<b>Literatur</b> .....	262

---

## 12.1 Einleitung

Luis G. Willumsen, einer der renommiertesten Wissenschaftler für die Verkehrsmodellierung, stellte 2013 auf einer Fachkonferenz fest: „We can no longer ignore them [autonome Fahrzeuge], if planning horizon is 10+ years“ [37]. Doch Arbeiten, die versuchen, die Auswirkungen der autonomen Fahrzeuge auf die Alltagsmobilität der potenziellen Nutzer und konkret deren Verkehrsmittelwahl zu antizipieren, finden sich erst selten [11], [19], [37]. Allerdings erlaubt ein Blick auf die individuellen Treiber unseres täglichen Mobilitätsverhaltens bereits jetzt vorsichtige Aussagen zu etwaigen Verhaltensänderungen durch die Einführung autonomer Fahrzeuge. Analogieschlüsse zur Nutzung bekannter Verkehrsmittel und ihre Übertragung in Verkehrsnachfragemodelle lassen erste quantitative Aussagen über Auswirkungen auf die Gesamtverkehrsnachfrage zu. Die Nachfragemodellierung ermöglicht es hierbei, zwischen unterschiedlichen räumlichen Kontexten und Nutzergruppen zu unterscheiden und verschiedene Szenarien zum Einsatz solcher Systeme zu evaluieren.

Ziel des Kapitels ist es, erste Ansätze zur Berücksichtigung autonomer Fahrzeuge bei der Verkehrsmittelwahl – auch „Modalwahl“ genannt – in Personenverkehrsnachfragemodellen zu skizzieren. Hierzu wird zunächst aufgezeigt, welchen Faktoren eine zentrale Rolle bei den individuellen Abwägungsprozessen zwischen unterschiedlichen Verkehrsmitteln zukommt. Der anschließende Abschnitt gibt eine kurze Einführung in die Funktionsweise von Verkehrsnachfragemodellen. Nachfolgend wird eruiert, welche Änderungen im Verkehrsmittelwahlverhalten durch die Einführung von autonomen Fahrzeugen möglich erscheinen. Differenziert nach unterschiedlichen Nutzungsszenarien wird erörtert, welche Eigenschaften der neuen Fahrzeuge, aber auch des räumlichen Kontextes und der etwaigen Nutzer selbst für die Wahrnehmung und Bewertung der Fahrzeuge von Bedeutung sein könnten und in welchem Konkurrenzverhältnis diese Fahrzeuge zu den bisherigen Verkehrsmitteln stehen. Zur Stützung der Ausführungen werden erste Ergebnisse einer Onlinebefragung zur Haltung gegenüber autonomen Fahrzeugen sowie ihres antizipierten Einsatzes vorgestellt. Abschließend wird aufgezeigt, welche Herausforderungen bei einer Integration autonomer Fahrzeuge in die modellgestützte Verkehrsnachfragebetrachtung bestehen und welche Erweiterungen der Modelle, aber auch der vorhandenen Datenbasis für eine adäquate Abbildung notwendig wären.

## 12.2 Kriterien der Verkehrsmittelwahl

Die Frage, warum wir uns für bestimmte Verkehrsmittel entscheiden, ist Gegenstand einer Vielzahl an Publikationen aus unterschiedlichsten Disziplinen. Einigkeit herrscht darüber, dass dem menschlichen Verkehrsverhalten und der Verkehrsmittelwahl eine Vielzahl an komplexen interdependenten Faktoren zugrunde liegt. Bühler (2011) folgend, lassen sich diese in vier Gruppen unterteilen: (1) sozioökonomische und demografische Faktoren, (2) kultureller Rahmen und individuelle Einstellungen, (3) Strukturen der Raumentwicklung und (4) politische Regelungen [6]. Ortúzar und Willumsen (2005) nennen neben personenbezogenen Kriterien vor allem Eigenschaften der beabsichtigten Fahrt und nicht zuletzt des Verkehrsangebotes bzw. der zur Verfügung stehenden Verkehrsmittel als ausschlaggebend [24].

Von besonderer Bedeutung bei der Wahl des Verkehrsmittels ist die Frage nach dem Zugang zu den Verkehrsmittelalternativen. Führerscheinbesitz, die individuelle Einkommenssituation und damit eng verbunden der Pkw-Besitz gelten als wichtige Determinanten des Verhaltens. Subanzielle Investitionen wie die Anschaffung eines Pkw oder einer Zeitkarte für den öffentlichen Verkehr wirken langfristig auf die Verkehrsmittelwahl [31]. Deutliche Unterschiede im Modalwahlverhalten lassen sich nach Geschlecht, Erwerbsstatus, Haushaltsgröße und -struktur aufzeigen; einen besonderen Einfluss hat das Vorhandensein von Kindern im Haushalt [6], [24], [28]. Aber nicht nur objektiv messbare Kriterien spielen eine wichtige Rolle: Individuelle persönliche Lebensumstände, der eigene Lebensstil, Einstellungen zu den verschiedenen Verkehrsmitteln und zum Unterwegssein an sich, aber auch alltägliche Gewohnheiten und Routinen wirken auf die Entscheidung (vgl. [25], [27], [29], [33]). Die deutliche Wirkung der verkehrlichen Sozialisierung sowie sozialer und ökologischer Normen wird insbesondere bei lerntheoretischen, kognitiven und sozialpsychologischen Ansätzen betont (vgl. [2], [12], [27]). Sie zeigen deutlich, dass die individuellen Entscheidungen in der Praxis dem Idealbild eines unabhängig und rational entscheidenden Menschen oft nicht entsprechen.

Der Wohnstandort gilt als hauptsächlichlicher räumlicher Ankerpunkt der individuellen Verkehrsentscheidungen. Die dort bestehenden Raumstrukturen wirken direkt auf die Erreichbarkeit der angestrebten Ziele und die für Mobilität erbrachten Aufwände ([6], [9], [27], s. Kap. 11). So werden eine höhere Bevölkerungsdichte, eine starke Nutzungsmischung sowie die Nähe zum öffentlichen Verkehr mit geringerer Pkw-Orientierung und einer vermehrten Nutzung von Fuß und Rad in Verbindung gebracht; gleichzeitig treten Staus, Parkplatzknappheit sowie höhere Parkkosten verstärkt in dicht besiedelten Gebieten auf [6].

Die mit der Nutzung eines Verkehrsmittels einhergehenden finanziellen Kosten sind nicht zuletzt direkte oder indirekte Folgen politischer Regulierungen: Kraftstoff- und Haltungskosten, Maut- und Parkkosten beeinflussen die Bewertung des Pkw. Die zeitlichen Aufwendungen, insbesondere im Vergleich mit dem Zeitaufwand, der für die Alternativverkehrsmittel notwendig wäre, bilden ein weiteres wichtiges Wahlkriterium. Dabei gilt es, zwischen der Zeit, die im Vor- und Nachlauf einer Nutzung anfällt, also beispielsweise für

den Weg zur Bushaltestelle und den Weg von der Bushaltestelle zum eigentlichen Ziel, und den eigentlichen Reisezeiten zu unterscheiden. Im Falle des öffentlichen Verkehrs lässt sich darüber hinaus zeigen, dass Warte- und Umsteigezeiten sowie die Anzahl der Umstiege maßgeblich die Bewertung beeinflussen [36]. Aber nicht nur instrumentelle Faktoren eines Verkehrsmittels, sondern auch die damit verbundenen symbolischen und affektiven Aspekte spielen eine große Rolle [33]. So wirken die vermeintliche oder reale Verlässlichkeit und Pünktlichkeit eines Verkehrsmittels ebenso wie die damit assoziierte Sicherheit, der empfundene Komfort, Fahrspaß oder auch die Flexibilität auf die Entscheidung für oder gegen ein spezifisches Verkehrsmittel [4], [24], [33].

Die Wahl eines Verkehrsmittels ist darüber hinaus auch abhängig vom Zweck des Weges. Dabei gilt es, nicht nur den einzelnen Weg, sondern den Kontext der gesamten Wegekette zu berücksichtigen, also *alle* Fahrten, die zwischen dem Verlassen der Wohnung und der Rückkehr vorgenommen werden [4]. Anzahl und Art der Begleitpersonen können dabei ebenso den Ausschlag für die Wahl eines Verkehrsmittels geben wie Transportnotwendigkeiten oder die zurückzulegende Distanz [16], [25], [33].

---

## 12.3 Die Verkehrsmittelwahl in angewandten Verkehrsmodellen

### 12.3.1 Eine kurze Einführung in die generelle Funktionsweise von Verkehrsnachfragemodellen

Verkehrsnachfragemodelle sind wichtige, etablierte Werkzeuge in verkehrsbezogenen Planungs- und Entscheidungsprozessen. Sie ermöglichen die Analyse der momentanen Verkehrssituation, die Prognose der zukünftigen Entwicklung der Verkehrsnachfrage oder die Untersuchung verschiedener potenzieller Entwicklungspfade anhand von Szenarien. Grundlage eines Verkehrsnachfragemodells stellt die vereinfachte, zweckspezifische Abbildung der Wirkungszusammenhänge zwischen dem Mobilitätsbedarf und seiner räumlichen Konkretisierung dar. Verkehrsmodelle sind mathematische Modelle, die hohe Anforderungen an Umfang und Detailtiefe der Eingangsdaten stellen und insbesondere in Bezug auf das menschliche Entscheidungsverhalten und das vorhandene Verkehrsangebot auf eine profunde empirische Datenbasis angewiesen sind.

Ziel der Personenverkehrsmodellierung ist die Abbildung all jener Entscheidungen von Individuen, die im Zuge einer geplanten Ortsveränderung getroffen werden. In der ersten Modellstufe, der *Verkehrserzeugung*, wird zunächst die Frage adressiert, wie viele Ortsveränderungen im Untersuchungsgebiet vorgenommen werden. Dazu wird für die Bevölkerung ermittelt, wie viele Wege oder Aktivitäten pro Person gemäß der Statistik an einem Tag zu erwarten sind. Die erzeugten Wege oder Wegeketten werden dabei nach Wegezweck unterschieden. Je nach Zweck des Weges erfolgt im nächsten Modellschritt, der *Zielwahl* oder *Verkehrsverteilung*, die Zuweisung eines Zielpunkts des Weges. Für die Kombination aus Ausgangs- und Zielort wird in der dritten Modellstufe, der *Verkehrsmittelwahl* oder *Verkehrsaufteilung*, zwischen den verschiedenen zur Verfügung stehenden Verkehrsmitteln

abgewogen und eines ausgewählt. Im abschließenden Schritt, der *Verkehrsumlegung* oder *Verkehrswegewahl*, wird für die Fahrten gegebenenfalls der Startzeitpunkt bestimmt und festgelegt, welche Route genutzt wird, um vom Ausgangs- zum Zielort zu gelangen. Grundlage hierfür ist das sogenannte Angebotsmodell, in dem die zur Verfügung stehenden Verkehrssysteme detailliert abgebildet sind und so Attribute der verschiedenen Strecken – z. B. die Reisezeiten zwischen zwei Orten – ermittelt werden können. Als Ergebnis einer Verkehrsnachfragemodellierung liegen für den Untersuchungsraum die Ortsveränderungen der Bevölkerung sowie die resultierenden Verkehrsstärken für die einzelnen Verkehrsträger vor. Die einzelnen, hier vereinfacht sequenziell dargestellten Modellstufen finden in der Praxis oftmals simultan bzw. rekursiv Anwendung – insbesondere die Verkehrsmittel- und Zielwahl werden häufig kombiniert. Für eine vertiefende Darstellung der Verkehrsmodellierung sei auf [5] und [24] verwiesen.

Verkehrsnachfragemodelle werden in der Regel in mikroskopische und makroskopische Modellansätze unterschieden. Die Modellansätze unterscheiden sich sowohl hinsichtlich der notwendigen Informationen und Eigenschaften als auch der Modelllogik bei der Abbildung von Entscheidungszusammenhängen. In *makroskopischen Nachfragemodellen*, oftmals auch als Vier-Stufen-Modelle (Four Steps Models, FSM) bezeichnet, spiegeln sich die genannten vier Stufen der Verkehrsmodellierung direkt wider. Die Bevölkerung im Untersuchungsgebiet wird anhand ihrer soziodemografischen, verkehrlich relevanten Eigenschaften derart in Gruppen unterteilt, dass das Verhalten innerhalb einer Gruppe möglichst ähnlich ist, im Vergleich zu anderen Gruppen jedoch signifikant abweicht. Typische Einteilungen erfolgen hierbei anhand des Geschlechts, des Alters, des Erwerbsstatus sowie des Pkw-Besitzes. Eine Berücksichtigung des Haushaltskontextes findet in der Regel nicht statt (s. zu Details u. a. [18]). Im Verlauf der Modellierung werden alle Wege, die von Individuen dieser Gruppen generiert werden, gemeinsam und unabhängig von den sonstigen Ortsveränderungen des Tages modelliert. Für weiterführende Darstellungen der funktionsweise makroskopischer Modelle sei auf [5] sowie [22] verwiesen.

Insbesondere in der regionalen Modellierung in den USA haben sogenannte aktivitätenbasierte oder *mikroskopische Modellierungsansätze* der Verkehrsnachfrage in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen. Im Vergleich zu makroskopischen Modellen legen diese einen stärkeren Fokus auf die individuellen Mobilitätsentscheidungen, die von Personen getroffen werden, und berücksichtigen in stärkerem Maße detaillierte Eigenschaften einer Person sowie des Haushaltskontextes. Die einzelnen Wege des Tages werden zu Touren zusammengefasst modelliert, die jeweils zu Hause starten und enden. Diese Form der Darstellung erlaubt die Berücksichtigung von Verhaltensabhängigkeiten zwischen einzelnen Aktivitäten und Entscheidungen. Im Zuge einer Mikrosimulation werden die Wegeketten für alle Personen im Untersuchungsgebiet einzeln berechnet und ergeben so das Gesamtbild der Verkehrsnachfrage. Vertiefte Informationen zur funktionsweise aktivitätenbasierter Modellierungsansätze finden sich in [7], [10] und [21].



### 12.3.2 Entscheidungskriterien in angewandten Modellen der Verkehrsmittelwahl

Der Verkehrsmittelwahl kommt eine herausragende Bedeutung bei der Nachfragemodellierung zu, sind ihre Resultate doch in hohem Maße planungs- und politikrelevant [24]. Zum Einsatz kommen in der Regel diskrete Wahlmodelle oder eng verwandte Methoden, die auf der Annahme eines streng rationalen Entscheidungsverhaltens basieren. Dabei handelt es sich um statistische Kausalmodelle, mit deren Hilfe Aussagen zu den jeweiligen Einflussfaktoren und ihre Einflusstärke auf die Entscheidung hergeleitet werden können. Geht man davon aus, dass sich der Gesamtnutzen einer Wahlalternative additiv aus den einzelnen Komponenten herleiten lässt, kann so der Nutzen einer Alternative berechnet und mit demjenigen der anderen zur Verfügung stehenden Verkehrsmittel verglichen werden. Die Wahrscheinlichkeit der Wahl einer Variante steigt mit ihrem relativen Vorteil gegenüber den sonstigen Optionen [20], [24]. Die spezifizierten Modelle können von unterschiedlicher Komplexität sein (vgl. beispielsweise [34]). Verkehrsmittelwahlmodelle, die in Nachfragemodelle integriert werden, berücksichtigen in der Regel jedoch nur wenige Variablen, welche die Eigenschaften der Verkehrsmittel, der Personen, der Wege sowie der Raumstruktur umfassen.

Bei der Beschreibung der zur Verfügung stehenden Verkehrsmittel nehmen die finanziellen und zeitlichen Kosten, die mit der Wahl einhergehen, die herausragenden Stellen ein. Im Falle des Pkw werden hier vorrangig Verbrauchskosten berücksichtigt, seltener Kosten der Anschaffung und Haltung. Bei den Zeitkosten handelt es sich vor allem um die durchschnittliche Fahrzeit, seltener und vor allem im öffentlichen Verkehr auch um die Zu- und Abgangszeiten. Bei letzterem werden oftmals zusätzlich die Anzahl der Umstiege, die Warte- und Umsteigezeiten oder auch Bedienungsintervalle berücksichtigt. Elemente wie die Zuverlässigkeit der Reisezeit finden sich bisher vorrangig in analytischen Modellen [4]. Mittels einer verkehrsmittelspezifischen Konstante können darüber hinaus nicht weiter spezifizierbare Nutzenkomponenten aggregiert Berücksichtigung finden. Alter, Geschlecht und Erwerbsstatus sowie Führerschein- und Pkw-Besitz zählen zu den üblichen soziodemografischen Attributen in den Modellen. Seltener finden sich Einkommensvariablen, das Bildungsniveau sowie die Haushaltsgröße oder die Anzahl der Kinder. Insbesondere bei den soziodemografischen Eigenschaften ist es üblich, diese bei der Ermittlung des Nutzens mit anderen Attributen zu interagieren und so personengruppenspezifische Stärken des Einflusses abzubilden. Die Beurteilung eines Verkehrsmittels kann auch von dem Zweck des Weges abhängen, und so sind ebenfalls wegezweckspezifische Interaktionsterme nicht unüblich. Eine besondere Bedeutung kommt hier der Unterscheidung der Arbeitswege zu. Aber auch die Transportnotwendigkeit oder die häufige Begleitung bei spezifischen Wegezwecken wie Einkauf oder Reisen können entsprechende Differenzierungen bedingen. Einen weiteren Bereich bilden die Raum- und Kontexteigenschaften. So können offizielle Raumtypisierungen oder auch die Bevölkerungsdichte am Wohnort eingesetzt werden, um eine Unterscheidung zwischen ländlicheren und dicht besiedelten Gebieten vorzunehmen. In manchen Modellen finden sich darüber hinaus Faktoren zur Beschreibung der Parksituation, der Parkkosten oder etwaigen Mautgebiete.

Verkehrsnachfragemodelle sind stark datengetrieben und setzen die Möglichkeit voraus, quantitative Aussagen zu Wirkungszusammenhängen treffen zu können. Mangels Daten können zahlreiche Faktoren, die als relevant für die Verkehrsmittelwahl bekannt sind, oft nur vereinfacht in den Modellen Berücksichtigung finden. Betroffen sind vor allem sogenannte „weiche Faktoren“ wie Routinen, die wahrgenommene Bequemlichkeit und Verlässlichkeit eines Verkehrsmittels, der assoziierte Fahrspaß, das damit verbundene soziale Ansehen oder auch das individuelle Sicherheits- und Rückzugsbedürfnis. Aber nicht nur Einstellungsfaktoren, auch das Wissen über die Alternativen, der eventuelle Planungsaufwand und das Abstimmungsverhalten im Haushalt sind Beispiele für Aspekte, die bei der Verkehrsnachfragemodellierung trotz ihrer bekannten Relevanz bisher kaum Berücksichtigung finden (vgl. u. a. [35]).

Eine spezielle Herausforderung besteht darüber hinaus in der Abbildung neuer Verkehrsmittel. Die Liberalisierung des Fernbusverkehrs in Deutschland, die Einführung stationsungebundener Carsharing-Angebote oder auch die Markteinführung elektrisch angetriebener Pkw sind Beispiele für Modifizierungen bestehender Verkehrsmittelangebote, bei denen sich eine Vorhersage der Nutzung schwierig gestaltet und belastbare Zahlen zu den Wirkungszusammenhängen fehlen. Doch auch eine Abgrenzung der verschiedenen bestehenden Verkehrsmittel anhand „harter“ Faktoren ist nicht immer einfach. Verkehrsmodelle wurden historisch vor allem zur Berechnung der Fahrleistung von Pkw eingesetzt. Noch 2012 konstatiert Bates, klassischerweise hätten Vier-Stufen-Modelle kaum mehr als eine Differenzierung zwischen „privaten Modi“, d. h. Pkw-Nutzung, und „öffentlichen“ Modi enthalten und wären erst in letzter Zeit um weitere Aspekte wie beispielsweise die Unterscheidung zwischen Fahrer und Mitfahrer erweitert worden [5]. Auch eine Differenzierung der Pkw, beispielsweise nach Größe oder Antriebsart, findet erst in neuerer Zeit Eingang in die Modelle. Insbesondere für die Integration autonomer Fahrzeuge in die Betrachtung offenbaren sich hier große Herausforderungen – denn schließlich gilt es, „das Auto“ näher zu betrachten und eine deutliche Unterscheidung zwischen Fahren und Gefahrenwerden, dem eigenen und einem geliehenen Pkw oder auch einem Taxi zu ermöglichen.

---

## **12.4 Welche Wirkung könnte die Einführung autonomer Fahrzeuge auf unser Verkehrsmittelwahlverhalten zeigen?**

Bevor der Frage nachgegangen wird, wie autonome Fahrzeuge in der Verkehrsmodellierung Berücksichtigung finden können, muss geklärt werden, wie sich die Einführung dieser Systeme auf die individuelle tägliche Mobilität auswirken könnte. Die potenzielle Nutzung autonomer Fahrzeuge oder auch neuer Mobilitätsangebote ist i. A. stark abhängig von ihren konkreten Einsatzmöglichkeiten und den Vorteilen, die sich im Vergleich zu momentan bereits verfügbaren Verkehrsmitteln bieten würden – von Faktoren also, die für die Bewertung der autonomen Fahrzeuge im Vergleich mit anderen Modi bei der Verkehrsmittelwahl relevant sind und somit – sofern möglich – Eingang in die Modelle finden sollten. Für die in Kap. 2 vorrangig unter technischen oder rechtlichen Gesichtspunkten beschriebenen

Anwendungsfälle werden daher in diesem Abschnitt zunächst mögliche Nutzungsvarianten erörtert. Im Vordergrund stehen dabei Fragen nach einer Typisierung der voraussichtlichen Nutzer, der Wege- und Einsatzzwecke, für die sich entsprechende Systeme besonders eignen, der Raum- oder Kontexteigenschaften, die eine Nutzung fördern, den relevanten Verkehrsmitelegenschaften sowie der Verkehrsmittelsubstitution, die sich als Resultat ergeben könnte. Der Fokus der Ausführungen wird auf diejenigen Eigenschaften gelegt, die sich für eine Abbildung in den Verkehrsmodellen eignen.

### **12.4.1 Der AutobahnpiLOT: ein Pkw mit dem besonderen Etwas für Ausnahmesituationen?**

Der AutobahnpiLOT stellt möglicherweise ein Einstiegsszenario in die Automatisierung dar, da die Fahraufgabe außer in „Ausnahmesituationen“ bestehen bleibt. Die zwei Hauptaspekte des AutobahnpiLOTen aus der Nutzerperspektive stellen die Entlastung des Fahrers sowie die Möglichkeit, die Zeit während des Fahrens anders verbringen zu können, dar.

Der Einsatz des AutobahnpiLOTen wird nur auf spezifischen Strecken möglich sein und damit vorrangig auf Überlandfahrten. Aus diesem Grund kann angenommen werden, dass er sich vor allem bei Fahrten mit längerer Dauer positiv auf die Wahrnehmung und Bewertung des Pkws auswirken würde. Die Nutzerbefragung von Continental zeigt des Weiteren deutlich, dass die Abgabe der Fahraufgabe insbesondere bei stressbelasteten oder als lästig empfundenen Situationen wie Staus oder Baustellen positiv konnotiert ist [8]. Nicht selten wird damit aber auch eine Einschränkung des Fahrvergnügens verbunden [1].

Die Möglichkeit einer veränderten, zumeist mit erhöhter Sinnhaftigkeit oder Produktivität assoziierten Zeitnutzung ist nach der verbesserten Verkehrssicherheit der wohl meistgenannte Vorteil autonomer Fahrzeuge (s. beispielsweise [23], [26], [30], [32]). Insbesondere bei beruflich oder privat stark eingebundenen Personen, bei Fahrten mit Kindern oder in Begleitung könnte dies zu einer positiveren Bewertung der Reisezeit führen – einem der wichtigsten Faktoren bei der Verkehrsmittelwahl in Modellen. Letztendlich könnte dies dazu führen, dass längere Fahrten mit öffentlichen Verkehrsmitteln, insbesondere für Personen, die diese Zeit aktiv nutzen, relativ betrachtet unattraktiver werden und der Pkw als bequemer wahrgenommene Alternative an Zuspruch gewinnt. Die Bedeutung der alternativen Zeitnutzung ist jedoch schwer zu bemessen: In der Continental-Studie gab z. B. nur rund ein Drittel der Befragten die Möglichkeit einer alternativen Zeitnutzung als attraktiv an [8].

### **12.4.2 Valet-Parken – nie mehr einen Parkplatz suchen?**

Beim Valet-Parken handelt es sich quasi um einen nur geringfügig modifizierten „normalen“ Pkw, bei dem die Fahraufgabe unverändert bestehen bleibt. Nur das Abstellen und das Vorfahren bei Nutzungswunsch übernimmt das Fahrzeug selbstständig innerhalb eines

definierten Radius. Gemäß einer Erhebung von AutoScout24 würden knapp zwei Drittel der Umfrageteilnehmer diese Funktion gern nutzen und nie wieder selbst einen Parkplatz suchen. Bei Bewohnern urbaner Gebiete ist der Anteil erwartungsgemäß höher [1] – ist die Funktion doch vor allem in Gebieten mit einer geringen Anzahl privater Stellplätze, mit Parkdruck und weiten Zu- und Abgangswegen vorteilhaft (s. auch Kap. 11). Sie hilft damit Zeit- und gegebenenfalls auch Parkkosten [19] zu sparen und wirkt komfortsteigernd, vor allem bei Transportaufgaben, dem Beisein von Kindern oder bei eingeschränkter Mobilität. Wenngleich eine höhere Carsharing-Nutzung vor allem bei der Einführung von Vehicles-on-Demand diskutiert wird (s. z. B. [11]), könnte der sinkende Zugangsaufwand beim Valet-Parken eventuell das Carsharing erleichtern. Als sichere Konsequenzen können eine substantielle Verringerung der Parksuchverkehre und damit einhergehend eine Senkung der Reisezeiten in bisher betroffenen Gebieten angesehen werden.

### 12.4.3 Bequem und sicher ans Ziel mit einem vollautomatisierten Fahrzeug

Das vollautomatisierte Fahren gilt als „Königsklasse der Fahrerassistenzsysteme“ [3]. Zwar wird – zumindest vorläufig – der Fahrzeuglenkende wohl prinzipiell in der Lage sein müssen, die Fahraufgabe zu übernehmen, notwendig soll dies aber nur auf Wunsch sein. Verbunden ist dieses Fahrkonzept bei hinreichenden Durchdringungsraten mit der Vision einer sichereren, zuverlässigeren Individualmobilität, einer Verbesserung des Verkehrsflusses und damit letztlich geringeren Stau- und Reisezeiten sowie einer erhöhten Planbarkeit des Reiseaufwandes [3], [26], [30]. Gleichzeitig kann davon ausgegangen werden, dass Besitz- und Nutzungshemmungen gegenüber dem Pkw sinken, insbesondere bei unerfahrenen, unsicheren oder auch älteren Fahrenden. Der Pkw wird so beispielsweise auch bei schlechteren Fahrkonditionen wie Dunkelheit, unbekanntem oder langen Strecken sowie schlechten Wetterbedingungen eine attraktivere Option (s. auch [11]). Als Folge davon ist mit einem Rückgang der Bringwege, der Nutzung des Taxis und des öffentlichen Verkehrs einerseits sowie einem Anstieg des Pkw-Besitzes andererseits zu rechnen.

Der aus Nutzersicht meistgenannte Vorteil entsprechender Fahrzeuge ist jedoch – analog zum Autobahnpiloten – die damit verbundene Hoffnung, „Zeit geschenkt [zu bekommen], die ich ganz für mich nutzen kann“ [26]. Es wundert daher wenig, dass zumeist Berufspendler als Zielgruppe dieser Technologie hervorgehoben werden (s. beispielsweise [17]) – bietet das vollautomatisierte Fahren doch auch und gerade in urbanen, dicht befahrenen Gebieten eine sinnvolle Nutzung der *Onboard*-Zeit. Auch hier gilt, dass dieser Vorzug vor allem dann zu einer positiveren Bewertung des Pkw führen dürfte, wenn die im Auto verbrachte Zeit vorher als nicht produktiv wahrgenommen wurde und der Fahrspaß nicht im Vordergrund der Nutzung steht. So lässt sich zeigen, dass der Nutzungswunsch besonders hoch bei Personen ausfällt, die sich nicht als passionierte Fahrer bezeichnen [17].

#### 12.4.4 Das Vehicle-on-Demand – Zipcar on Steroids?

Ein Szenario, das von einer insbesondere in urbanen Räumen in weiten Teilen für jedermann verfügbaren und nutzbaren Flotte an Fahrzeugen ausgeht, würde sicherlich die weitreichendsten Auswirkungen auf das tägliche Verkehrsverhalten implizieren. Als konsequente Weiterführung des vollautomatisierten Fahrzeuges, jedoch ohne Übernahme einer Fahrfunktion, ermöglicht es die individuelle, unabhängige Mobilität auch für Personen ohne Führerschein und eigenen Pkw: Kinder, Alte, Mobilitätseingeschränkte, sensorisch Beeinträchtigte etc. (vgl. u. a. [19]).

Generell ist davon auszugehen, dass das Individualfahrzeug durch die damit gleichzeitige einhergehende Senkung der Zu- und Abgangszeiten insbesondere in Gebieten mit Stellplatzproblematik an Attraktivität gewinnen wird. Neben einer denkbaren Senkung der Parkkosten durch die Möglichkeit, das Fahrzeug auch in weiterer Entfernung zum eigentlichen Zielort abzustellen, ist mit einer deutlichen Verringerung sogenannter Bring- und Holwege sowie der Nutzung von Fahrdiensten und Taxis zu rechnen – eventuell bei gleichzeitiger Zunahme der Leerfahrten.

Als Folge der Einführung von Vehicle-on-Demand-Flotten wird gleichzeitig unisono eine substantiell niedrige Autobesitzquote erwartet [19], [37], die mit einem Boom des Carsharing einhergehen könnte: Silberg et al. (2012) sprechen mit Verweis auf das aus den USA stammende Carsharing-Unternehmen gar von „Zipcar on Steroids“ [30]. Insbesondere bei Zweitwagen erscheint es plausibel, dass diese durch entsprechende Angebote abgelöst würden, die gleichzeitig eine Anpassung des gewählten Fahrzeuges an die situative Beförderungs- und Parksituation oder auch an Wetterbedingungen ermöglichen (vgl. [17], [37]).

Dass von einer substantiellen Wirkung auf den individuellen Pkw-Besitz ausgegangen werden kann, erwarten Fagnant und Kockelman (2013): Gemäß ihrer Simulationsrechnungen für die USA könnte ein einzelnes Vehicle-on-Demand bis zu 13 private Pkw substituieren [11]. Arbeiten zum stationsgebundenen Carsharing beziffern die Substitutionsraten auf bis zu acht durch ein einzelnes Carsharing-Auto ersetzte private Pkw in Deutschland [15]. Da ein Vehicle-on-Demand durch den Wegfall des Zugangsweges einen größeren Einzugsbereich abdecken könnte, erscheinen diese Abschätzungen durchaus nicht unrealistisch. Ein Blick auf die Nutzerstruktur bestehender Carsharing-Angebote gibt erste Hinweise auf die potenziellen Nutzer von Vehicle-on-Demand-Angeboten: Insbesondere jüngere Personen mit überdurchschnittlicher Bildung und Einkommenssituation sowie einem ausgeprägten Interesse an ökologischen Themen nutzen in Deutschland stationsgebundene Carsharing-Angebote; die noch recht neuen stationsungebundenen Angebote werden vor allem von urbanen, männlichen Nutzern als flexible Verkehrsmitteloption bei kürzeren Wegen eingesetzt (vgl. [13], [14]). Die Nutzung von Vehicle-on-Demand-Angeboten als Alternative zum eigenen Pkw könnten so direkt zur Förderung eines multimodalen Verkehrsmittelwahlverhaltens oder zu einem Anstieg von Fahrgemeinschaften beitragen (vgl. [26]). Insbesondere vor dem Hintergrund einer positiver beurteilten Zeit im Fahrzeug ist jedoch auch ein Anstieg der Pkw-Nutzung und -Fahrleistung im Zuge der omnipräsenten

Verfügbarkeit ([11], [37], s. Kap. 11) denkbar. Das Thema „Neue Mobilitätskonzepte“ wird in Kap. 9 umfassend betrachtet.

Doch nicht nur der individuelle Pkw-Besitz könnte in einem solchen Szenario weitreichenden Änderungen unterworfen sein. Fahrdienste, Taxen und der öffentliche Verkehr könnten sich in einer verschärften Wettbewerbssituation zum Individualtransportmittel wiederfinden. Insbesondere im ländlichen Raum könnten Vehicle-on-Demand-Flotten einerseits als flexible, individuelle Zubringerdienste zum öffentlichen Nahverkehr dienen oder die bequeme Überwindung der „letzten Meile“ im öffentlichen Fernverkehr gewährleisten. Kritische Betrachtungen erlauben aber auch die These, dass sie die Versorgung mit öffentlichen Massenverkehrsmitteln nicht ergänzen, sondern langfristig sogar ganz ersetzen könnten: „... eventually, mobility on demand may prove a better investment than new mass transit systems.“ [17]: eine Einschätzung, die auch von Willumsen (2013) geteilt wird [37]. In diesem Fall lassen sich Annahmen, dass die individuell zurückgelegten Personenkilometer deutlich ansteigen könnten, sicherlich nicht von der Hand weisen.

#### **12.4.5 Das Auto der Zukunft: Konkurrenz für das Auto, das Taxi oder die Bahn?**

Die Analyse der bisher zur Verfügung stehenden Literatur zeigt, dass die Einführung autonomer Fahrzeuge sehr unterschiedliche Auswirkungen auf unsere tägliche Mobilität und unsere gewählten Verkehrsmittel haben könnte. Das autonome Fahren stellt somit nicht immer nur eine leichte Modifikation unseres altbekannten Pkw dar, durch die sich der Verkehrsfluss und die Reisezeiten verbessern und wahlweise Unterstützungsoptionen genutzt werden können, wie eine Grafik in der KPMG-Studie [17] suggeriert. Vielmehr unterscheiden sich die potenziellen Auswirkungen auf die individuell oder auch öffentlich zur Verfügung stehenden Verkehrsmittel enorm. Die weitreichenden Implikationen, die sich aus den unterschiedlichen Szenarien für das Gesamtverkehrssystem und die Nutzung des öffentlichen Raumes generell ergeben könnten, werden in Kap. 11 vertieft aufgegriffen. Deutlich zeigt sich in der vorangegangenen Literaturanalyse zu möglichen Auswirkungen auf die Verkehrsmittelwahl, dass die wahrnehmungs- und bewertungsrelevanten Eigenschaften in den verschiedenen Nutzungsszenarien sehr unterschiedlich sein können und somit eine differenzierte Betrachtung bei der Analyse einer möglichen Abbildung autonomer Fahrzeuge in der Verkehrsnachfragemodellierung erfordern.

---

### **12.5 Welche Einsatzmöglichkeiten sehen Privatpersonen für autonome Fahrzeuge? Erste Ergebnisse einer Befragung**

Seit 2012 wurden vereinzelt quantitative Studien zum Thema des autonomen Fahrens durchgeführt [1], [8], [17]. Der Fokus der Erhebungen liegt in der Regel auf Einstellungs- und Akzeptanzfragen oder gewünschten Unterstützungsfunktionen. Mit einigen Fragen zur an-

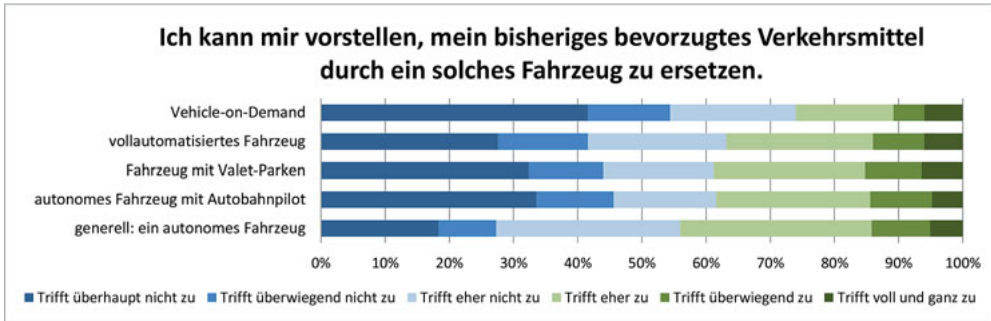
tizipierten Nutzung und alternativen Zeitverwendung ist die Mobilitätsstudie 2013 von Continental [8] hervorzuheben. Allen Studien ist jedoch gemein, dass sie keine Differenzierung der möglichen Ausprägungen des autonomen Fahrens berücksichtigen und nicht auf die Art der möglichen Verhaltensänderungen oder der potenziellen Einsatzzwecke abzielen.

Aus diesem Grund wurde im Juni 2014 eine Erhebung durchgeführt, die empirische Aussagen sowohl zu Fragestellungen dieses Beitrags als auch zur Ausgestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle (s. Kap. 6) sowie zur Akzeptanz autonomer Fahrzeuge (s. Kap. 29) ermöglicht. Dabei handelt es sich um eine quasi-repräsentative Onlineerhebung, die sich auf die Einstellungen der Befragten bezieht und auf ihre Einschätzung zur Nutzung eines autonomen Fahrzeugs entsprechend der verschiedenen Nutzungsszenarien des Projektes. Die nach Geschlecht, Alter, Einkommen und Bildung geschichtete Stichprobe umfasst jeweils 250 vollständige Fragebögen pro Nutzungsszenario, insgesamt also 1000 Befragte. Der Datensatz erlaubt es, mittels quantitativer Methoden eine erste Einschätzung zur Haltung verschiedener Nutzergruppen zu autonomen Fahrzeugen und Mobilitätsangeboten zu erlangen und so die Ausführungen des vorangegangenen Abschnittes zu ergänzen. Ziel der Befragung aus Sicht der Nachfragemodellierung ist es vor allem zu ergründen, welche Unterscheidungen bei den Nutzern, den Wege- und Einsatzzwecken, aber auch den Verkehrsmitelegenschaften für eine Abbildung autonomer Fahrzeuge in Verkehrsmodellen wichtig sind. Auch sollen mithilfe der Datenanalysen erste Hinweise darauf erlangt werden, mit welchen Verkehrsmitteln die autonomen Fahrzeuge aus heutiger Sicht in Nutzungskonkurrenz stehen könnten und wie sich die Reisezeitverwendung und -bewertung ändern könnte.

Der Fragebogen enthält zunächst Fragen zur Soziodemografie der Probanden, zu ihrem Kenntnisstand und ihrem Interesse am autonomen Fahren sowie zur bisherigen Nutzung von Assistenzsystemen. Anschließend wird die momentane Nutzung von und Einstellung gegenüber den zur Verfügung stehenden Verkehrsmitteln und die übliche Zeitverwendung bei ihrer Nutzung erhoben. Die Probanden beantworten darüber hinaus für jeweils eines der im Projektkontext verwendeten Nutzungsszenarien AutobahnpiLOT, autonomes Valet-Parken, vollautomatisiertes Fahrzeug sowie Vehicle-on-Demand (s. Kap. 2) vertiefende Fragen zur antizipierten Nutzung, zum ersetzten Verkehrsmittel, zur Einstellung gegenüber dem beschriebenen Fahrzeug, zum Bedürfnis nach Interventionsmöglichkeiten, zu verschiedenen Erlebnisaspekten und zu konkreten Gestaltungswünschen. Die Beschreibungen der Szenarien sind dabei kurz gehalten, um den Befragungsteilnehmern Platz für eigene Interpretationen zu gewähren. Ein tabellarischer Überblick der soziodemografischen Eigenschaften der Befragten sowie der Stichprobenstruktur findet sich in Kap. 6.

### **12.5.1 Wer kann sich vorstellen, sein bisher bevorzugtes Verkehrsmittel zu ersetzen?**

Um die Wirkung autonomer Fahrzeuge auf die Verkehrsmittelwahl abbilden zu können, ist es besonders wichtig zu wissen, welche Verkehrsmittel von diesen autonomen Fahr-



**Abb. 12.1** Konstatierte Ersetzungsbereitschaft des bevorzugten Verkehrsmittels durch ein autonomes Fahrzeug generell sowie in den verschiedenen Nutzungsszenarien

zeugen substituiert werden könnten. Daher thematisiert die Erhebung in einer der ersten Fragen die grundsätzliche Bereitschaft, das bevorzugte Verkehrsmittel durch ein autonomes Fahrzeug zu ersetzen – zunächst ohne eine Differenzierung. Im weiteren Verlauf wird zusätzlich für die jeweiligen Nutzungsszenarien erhoben, ob die Befragten sich vorstellen könnten, ein entsprechendes Fahrzeug generell zu nutzen bzw. ihr bevorzugtes Verkehrsmittel durch ein autonomes Fahrzeug zu ersetzen. Die Ergebnisse wurden auch daraufhin untersucht, ob sich signifikante Unterschiede im Antwortverhalten der Befragten in Abhängigkeit von ihren soziodemografischen Eigenschaften und Einstellungen nachweisen lassen.<sup>1</sup> Entsprechende statistische Kennwerte zeigen auf, dass bei einer Integration in die Modelle eine Unterscheidung des Verhaltens anhand dieser Kriterien vorgenommen werden sollte – die konkrete Stärke oder Richtung der Wirkung ist zunächst zweitrangig.

Die jeweiligen Antworten für den Ersetzungswunsch sind in Abb. 12.1 dargestellt und entsprechen in der Tendenz dem generellen Einsatzwillen (s. Kap. 31). Auffällig ist, dass die Mehrheit der Befragten sich eher nicht bis gar nicht vorstellen kann, einem autonomen Fahrzeug den Vorrang vor ihrem bisherigen Standardverkehrsmittel zu geben. Weniger als 15 Prozent der Befragten stimmen der Aussage zu, ein – wie auch immer geartetes – autonomes Fahrzeug überwiegend oder ganz als Ersatz nutzen zu wollen. Während bei der generellen Aussage der Anteil der unentschiedenen Befragungsteilnehmer sehr hoch ausfällt, sinkt der Zustimmungswert in den Szenarien deutlich und unterscheidet sich statistisch signifikant zwischen den einzelnen Szenarien. Mit nur rund einem Viertel positiver Antworten sticht das Vehicle-on-Demand dabei als besonders skeptisch betrachteter Anwendungsfall heraus. Dem Vollautomaten hingegen stehen die Befragten im Durchschnitt am positivsten gegenüber.

<sup>1</sup> Als statistisch signifikant werden nachfolgend Unterschiede aufgeführt, die bei einem Chi-Quadrat-Test nach Pearson Werte von 0,05 oder niedriger aufweisen. Bei einigen Variablen, insbesondere den Einstellungs- und Raumvariablen war ein Test aufgrund der Fallzahlen in den einzelnen Antwortkategorien nicht immer möglich.



Bei einer differenzierten Betrachtung des Wechselwunsches lassen sich für die Haushaltsgröße und das Vorhandensein von Kindern, das Einkommen sowie die Anzahl der Autos im Haushalt statistisch hoch signifikante Unterschiede aufzeigen. Am deutlichsten diskriminierend wirkt jedoch die Einstellung zum Auto, ermittelt über Fragen zur Assoziation von Fahrspaß und Autofahren sowie anhand der Frage, ob die Probanden den Alltag ohne Auto gestalten könnten. Auch die Art des Wohnortes bewirkt deutliche Unterschiede im Antwortverhalten: so antworten beispielsweise Bewohner ländlicher Kreise weniger ablehnend als Großstadtbewohner. Geschlecht, Bildungsstand oder Erwerbsstatus hingegen wirken sich nicht statistisch signifikant auf das Antwortverhalten aus; dies gilt auch für den wahrgenommenen Parkdruck am Wohn- oder Hauptbezugsort. Differenziert nach den Nutzungsszenarien sind eine höhere Skepsis bei Frauen gegenüber dem Vehicle-on-Demand hervorzuheben sowie starke Unterschiede im Antwortverhalten gegenüber dem Valet-Parken in Abhängigkeit vom Vorhandensein von Kindern, von der Haushaltsgröße und vom Einkommen.

Die Teilnehmer wurden darüber hinaus für je ein Szenario gefragt, wie sich ihrer Meinung nach die Nutzung eines autonomen Fahrzeugs auf ihre bisherige Verkehrsmittelnutzung auswirken würde. Die Antworten erfolgten dabei für jedes bisherige Verkehrsmittel separat und reichten von „viel seltener“ (-2) bis hin zu „viel häufiger“ (+2). Auffallend ist auch hier der große Prozentsatz derjenigen, die nicht von einer Änderung ihres Verhaltens ausgehen: Mit Ausnahme des Taxis und des konventionellen Pkw geben stets zwischen 50 und 64 Prozent der Befragten an, keine Änderung in ihrer Verkehrsmittelnutzung vorauszusehen. Die jeweiligen Mittelwerte der gegebenen Antworten für die einzelnen antizipierten Verlagerungswirkungen sind in Tab. 12.1 darstellt. Ein Mittelwert von 0 ist dabei als Indifferenz zu werten. Die Taxinutzung wird in allen Szenarien als rückläufig eingeschätzt. Bemerkenswert ist, dass das Valet-Parken die stärksten Wechselassoziationen bewirkt – insbesondere bei der Taxinutzung liegt der Mittelwert der Antworten mit -0,78 sehr niedrig.

**Tab. 12.1** Auswirkung der Szenarien auf die bisherige Verkehrsmittelnutzung

Szenario	Ich würde ... mit öffentlichen Verkehrsmitteln fahren.	Ich würde ... mit dem Rad oder zu Fuß unterwegs sein.	Ich würde ... mit dem Zug unterwegs sein.	Ich würde ... mit dem Taxi fahren.	Ich würde ... mit einem konventionellen Pkw fahren.
Autobahnpiilot	-0,36	-0,28	-0,35	-0,70	0,04
Valet-Parken	-0,44	-0,28	-0,51	-0,78	-0,32
Vollautomat	-0,33	-0,11	-0,41	-0,74	-0,23
Vehicle-on-D.	-0,33	-0,15	-0,35	-0,78	-0,13

Mittelwerte der Antwortoptionen -2 viel seltener; -1 seltener; 0 gleich häufig; 1 häufiger; 2 viel häufiger

### 12.5.2 Worin sehen die Befragten den spezifischen Vorteil der autonomen Fahrzeuge?

Eine weitere Frage untersucht, bei welchen Einsatzzwecken oder Wegeeigenschaften sich die Probanden einen Einsatz autonomer Fahrzeuge als besonders hilfreich vorstellen. Die Mittelwerte der Antworten sind in Tab. 12.2 dargestellt. Dass die Unterschiede zwischen den Szenarien mit Ausnahme der Begleitwege stets hoch signifikant sind, kann als Zeichen gewertet werden, dass die Probanden klare Unterscheidungen zwischen den Szenarien vornehmen können. Auffallend sind die vergleichsweise hohen Zustimmungswerte des Vollautomaten auf langen (Überland-)Wegen und Reisen, in geringerem Maße auch bei höheren Besetzungsgraden. Das Valet-Parken wird insbesondere im städtischen Kontext sowie bei Transportaufgaben als hilfreich eingestuft.

Bei einer differenzierten Betrachtung fällt auf, dass männliche Antwortpersonen statistisch signifikant für alle Wegezwecke höhere Zustimmungsraten für das Vehicle-on-Demand angeben; bei Arbeits- und weiten Wegen gilt dies auch für den Autobahn-piloten. Auch lässt sich zeigen, dass der Bildungsstand, gemessen am Vorhandensein des Abiturs, signifikante Auswirkungen auf die Einstellung zum Vehicle-on-Demand auf weiten (Überland-)Wegen, Reisen und bei Wegen in Begleitung aufweist. Die Anwesenheit von Kindern im Haushalt wirkt sich signifikant positiv auf die empfundene Nützlichkeit des Vollautomaten bei Fahrten in die Stadt sowie über Land aus. Bei Bringwegen konnte hingegen kein Zu-

**Tab. 12.2** Konstatierte Antworten der Befragten, bei welchen Wegen sie ein solches Fahrzeug besonders hilfreich fänden

	Autobahn-pilot	Valet-Parken	Vollauto-mat	Vehicle-on-Demand
...wenn ich zur Arbeit oder zur Ausbildung fahre.	-1,0	-0,4	-0,2	-0,6
...wenn ich einkaufen fahre oder Erledigungen nachgehe.	-1,2	0,2	-0,3	-0,4
...wenn ich Personen bringe oder abhole.	-0,8	-0,4	-0,1	-0,5
...wenn ich zur Freizeitgestaltung fahre.	-0,8	-0,4	-0,4	-0,7
...wenn ich Reisen oder Ausflüge unternehme.	0,1	-0,1	0,4	-0,2
...wenn ich lange unterwegs bin.	0,4	-0,2	0,8	0,2
...wenn ich in Begleitung bin.	-0,4	-0,4	0,0	-0,4
...wenn ich in der Stadt unterwegs bin.	-1,1	0,5	-0,1	-0,4
...wenn ich über Land fahre.	-0,4	-1,0	0,3	-0,3
...wenn ich Gepäck dabei habe.	-0,9	0,3	-0,4	-0,5

Mittelwerte der Antwortoptionen -2 viel seltener; -1 seltener; 0 gleich häufig; 1 häufiger; 2 viel häufiger

sammenhang festgestellt werden. Bei weiten Wegen und Fahrten in die Stadt zeigen sich für das Valet-Parken Antwortunterschiede in Abhängigkeit von der Haushaltsgröße sowie der Anwesenheit von Kindern. Der Erwerbsstatus<sup>2</sup> bedingt fast ausschließlich beim Valet-Parken Unterschiede in den Antworten auf Arbeitswegen, weiten Wegen sowie Freizeitwegen; bei letzteren gilt dies zusätzlich auch für die Einkommenshöhe.

### 12.5.3 Was machen wir heute und zukünftig unterwegs?

Die Möglichkeit, während der Fahrt einer anderen Betätigung nachgehen zu können, zählt zu den hauptsächlichen Eigenschaften des automatisieren Fahrens aus Nutzungssicht. Gleichzeitig stellen Zeitkosten einen Haupttreiber der Verkehrsmittelwahl in Modellen dar. Abschließend soll daher ein Blick auf Ergebnisse der Befragung hinsichtlich der bisherigen und vielleicht auch zukünftigen Zeitnutzung geworfen werden.

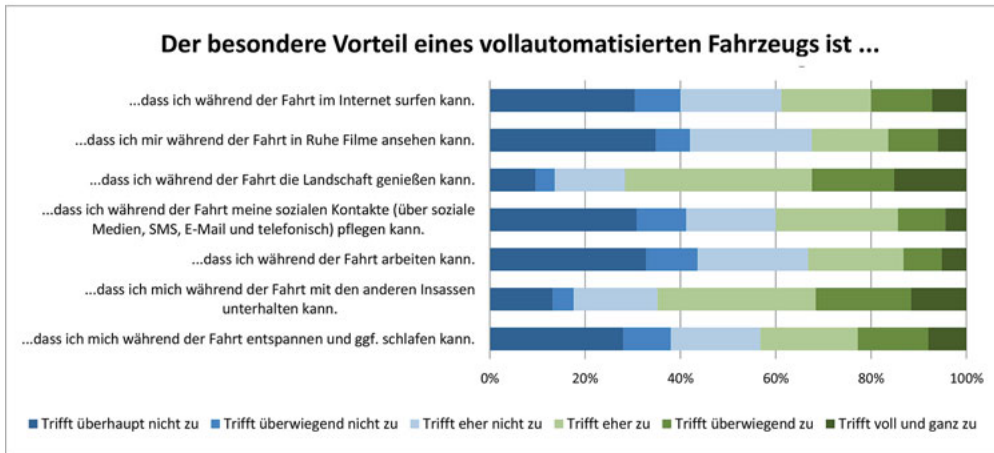
Die Probanden wurden zunächst gefragt, welchen Beschäftigungen sie in der Regel bei Fahrten mit dem öffentlichen Nahverkehr, der Bahn oder dem Auto nachgehen. Die mit Abstand meistgenannten Betätigungen im öffentlichen Verkehr sind der Genuss der Landschaft und der Fahrt: 50 Prozent der Befragten geben an, dies im ÖV häufig oder immer zu tun, in der Bahn 66 Prozent. Ähnlich beliebt ist die Unterhaltung mit Begleitpersonen oder anderen Passagieren (ÖV: 42 Prozent, Bahn: 49 Prozent). Es folgen das Hören von Musik, Lesen oder die Entspannung als oft genannte Tätigkeiten. Rund 77 bzw. 69 Prozent der Befragten geben an, nie im Nah- oder Fernverkehr zu arbeiten; knapp 6 bzw. 8 Prozent arbeiten häufig oder immer. Die Antworten zur Arbeit unterwegs unterscheiden sich insbesondere im Zug statistisch signifikant nach Geschlecht, Einkommen, Bildungsstand, Haushaltsgröße sowie dem Vorhandensein von Kindern im Haushalt. So geben 74 Prozent der Frauen und 63 Prozent der Männer an, im Zug nie zu arbeiten; die Wahrscheinlichkeit, im Zug häufig oder immer zu arbeiten, verdoppelt sich bei einem Nettohaushaltseinkommen von über 2600 Euro gegenüber der Vergleichsgruppe auf rund 10 Prozent.

Momentane Hauptbetätigung im Pkw ist naturgemäß die Konzentration auf die Fahrt und die Route. Rund 80 Prozent hören dabei häufig oder immer Musik; rund zwei Drittel unterhalten sich, über die Hälfte der Befragten genießt unterwegs häufig oder immer die Fahrt und die Landschaft. 7 Prozent der Befragten geben an, manchmal im Auto zu arbeiten.

Betrachtet man die von den Befragten wahrgenommenen besonderen Vorteile autonomen Fahrens im Hinblick auf die Möglichkeit einer alternativen Zeitnutzung während der Fahrt, so werden vor allem die Möglichkeit zur Unterhaltung sowie des Landschaftsgenusses genannt – den bereits jetzt liebsten Beschäftigungen im Auto. Exemplarisch sind in Abb. 12.2 die Antworten zum vollautomatisierten Fahrzeug dargestellt. Auffallend ist der geringe Anteil derjenigen, die einen Vorteil in der Möglichkeit sehen, unterwegs arbeiten zu können; beim Autobahnpielen ist es weniger als ein Viertel der Befragten.

---

<sup>2</sup> Beim Erwerbstatus wurde zwischen Vollzeit-, Teilzeit- sowie sonstiger Beschäftigung unterschieden.



**Abb. 12.2** Konstatierte Vorteile des vollautomatisierten Fahrzeugs

## 12.6 Autonome Fahrzeuge in der Nachfragemodellierung: Möglichkeiten und Grenzen einer Integration

Die Analyse der möglichen Wirkungen der einzelnen Nutzungsszenarien zeigt deutlich die Notwendigkeit einer Differenzierung bei der Integration autonomer Fahrzeuge in die Nachfragemodellierung auf. Während es sich sowohl beim Autobahnpiloten als auch bei der Funktion des Valet-Parkens in weiten Teilen um spezielle, temporär beschränkte Sonderformen eines ansonsten weitgehend gleich bleibenden Autofahrens bzw. Fahrzeugs handelt, ist mit der Einführung vollautomatisierter Fahrzeuge ein quasi neues Verkehrsmittel oder mit der Einführung einer Vehicle-on-Demand-Flotte möglicherweise ein komplett neuartiges Mobilitätsangebot verbunden.

Die sicherlich größte Herausforderung bei der Abbildung autonomen Fahrens in der Nachfragemodellierung besteht darin, eine stärkere Differenzierung des Individualverkehrsmittels „Auto“ zu ermöglichen. Der klassischen Beschreibung dieser Verkehrsmitteloption anhand der Hauptkriterien Fahrzeit- und Nutzungskosten sowie einer oftmals nicht weiter spezifizierten Präferenz der Entscheidenden mangelt es vor allem an der Möglichkeit, die Rolle des Fahrers und des Besitzstandes angemessen zu berücksichtigen. Unterscheidungen zwischen Fahren und Gefahrenwerden, dem Fahren des eigenen oder eines beliebigen Fahrzeuges sind Voraussetzung einer adäquaten Abbildung. Nur so ist es möglich, sowohl die Rolle des Fahrers von der des Beifahrers oder des vom Vollautomaten Chauffierten zu unterscheiden. Ebenso notwendig ist eine Differenzierung zwischen dem klassischen Pkw, einem vollautonomen Fahrzeug, einem Taxi oder einem geliehenen Vehicle-on-Demand. Der Wunsch einer Integration autonomer Fahrzeuge in die Modellierung geht somit direkt einher mit der Notwendigkeit, die einzelnen zur Verfügung stehenden Alternativen differenzierter beschreiben zu können. Gerade die fließenden, vom Nutzer

und seiner Fahrt abhängigen Übergänge vom Fahrer zum Quasi-Beifahrer beim Autobahn-piloten und beim Vollautomaten stellen hier eine besondere Herausforderung dar.

Die Reisezeit ist einer der einflussreichsten Treiber der Verkehrsmittelwahl in bestehenden Verkehrsmodellen. Bei der Modellierung des öffentlichen Verkehrs wird häufig zwischen der *Onboard*- oder eigentlichen Reisezeit, der Wartezeit sowie den Zugangs- und Abgangszeiten unterschieden, sodass auch unterschiedliche Bewertungen der Zeitkomponenten möglich sind. Bisher erfolgt jedoch weder hier noch bei anderen Verkehrsmitteln eine vertiefte Betrachtung der im Fahrzeug verbrachten Zeit. Die mit der Einführung autonomer Fahrzeuge verbundenen Erwartungen, die Zeit im Fahrzeug subjektiv sinnhafter verbringen zu können, zeigt daher deutlich die Notwendigkeit einer Unterscheidung in den Modellen auf. Die Distanz bzw. Dauer der Fahrt und damit auch der potenziell nutzbare Fahrtenanteil rücken hier ebenso in den Fokus wie die Frage, welche alternativen Betätigungen angestrebt werden oder mit wem die Fahrt durchgeführt wird.

Doch nicht nur die Zeit im Fahrzeug ist Änderungen unterworfen, besteht doch die auffälligste vom Valet-Parken bedingte Änderung in einer Verringerung des Nutzungsaufwandes am Anfang und am Ende der Fahrt. Gleiches gilt für das Vehicle-on-Demand. Auch hier zeigt sich die Notwendigkeit, die in den Modellen oftmals sehr pauschale Betrachtung der mit der Wahl eines Verkehrsmittels einhergehenden Reisezeit weiter zu differenzieren. Als konkrete Beispiele seien hier die Wartezeiten auf ein Taxi oder die Zugangszeiten zum eigenen oder geliehenen Pkw genannt.

Ein Aspekt, der sich in vereinfachter Form durch eine Modifikation der Reisezeiten vergleichsweise leicht in die Modelle integrieren lässt, besteht in der Verkürzung der Reisezeiten, die sich direkt aus dem Fehlen von Staus oder störenden Parksuchverkehren ergeben könnte. Problematischer ist die zumeist fehlende Abbildung der Wirkung einer Verlässlichkeitssteigerung der zeitlichen Prognosen von Reisezeiten auf die Bewertung des Pkw als Verkehrsmittelalternative. Die Komfortsteigerung, die sich aus neuen Funktionen wie dem Valet-Parken oder dem Autobahn-piloten ergeben, der eventuelle Sicherheitsanstieg oder auch die erhöhte Flexibilität der Fahrzeugausstattung sind weitere Beispiele relevanter subjektiver Kriterien, die bei der bisherigen Betrachtung der Verkehrsmittelwahl kaum Berücksichtigung finden. Die Problematik, subjektive Aspekte zu erfassen, in ihrer Wirkung zu quantifizieren und bei der Verkehrsmittelwahl als Faktoren zu berücksichtigen, gilt jedoch nicht nur für die Eigenschaften der Verkehrsmittel, sondern mindestens ebenso für die Beschreibung der Nutzer. Insbesondere der empfundene Fahrspaß, das Empfinden des eigenen Fahrvermögens, die Bereitschaft zur Abgabe der Fahrfunktion, die Aversion gegenüber einem etwaigen Kontrollverlust oder das Vertrauen in die Technik sind Beispiele von Faktoren, die gerade bei autonomen Fahrzeugen verstärkte Relevanz bei der Beurteilung erlangen (s. Kap. 29) und somit vermehrt in den Fokus der Modellierung rücken sollten.

Die Identifikation von Nutzergruppen, die sich hinsichtlich ihrer Bewertung verschiedener Verkehrsmitteloptionen unterscheiden, ist eines der wichtigsten Fundamente zur Beschreibung der Personen in den Modellen. Sowohl die literaturbasierten Wirkungsanalysen als auch die Ergebnisse der Befragung weisen deutlich darauf hin, dass sich die realen oder wahrgenommenen Vorteile autonomer Fahrzeuge nicht nur je nach Szenario,

sondern auch je nach Einstellungen und soziodemografischen Eigenschaften unterscheiden. Neben den klassischen Attributen Geschlecht, Erwerbsstatus, Alter und Führerschein zeigten sich je nach Nutzungsszenario vor allem die Haushaltsgröße, das Vorhandensein von Kindern im Haushalt, das Bildungsniveau sowie das Haushaltseinkommen als relevante Unterscheidungsfaktoren. Im Zuge einer Abbildung autonomer Fahrzeuge wäre hier sicherlich eine Erweiterung der in den Modellen verwendeten Attribute zur Beschreibung der Personen, vor allem aber auch des Haushaltskontextes zu diskutieren. Darüber hinaus gilt auch hier, dass die Berücksichtigung von Einstellungsfaktoren wie die Haltung gegenüber verschiedenen Verkehrsmitteln, Routinen oder auch zeitliche Eingebundenheit kaum erfolgt.

Für die Verkehrsmittelwahl besonders relevante Personen- und Haushaltsattribute sind der Besitz eines Führerscheins sowie der Zugang zu einem Pkw, in der Regel ausgedrückt durch die Anzahl der Pkw im Haushalt oder auch die tatsächliche Verfügbarkeit am Stichtag der Verhaltenshebung. In der makroskopischen Modellierung handelt es sich bei der Pkw-Verfügbarkeit um das gängige Kriterium, anhand dessen die Nutzersegmentierung vorgenommen und die Aufkommensraten bestimmt werden. Bei der Verkehrsmittelwahl selbst wird dann von einer generellen Verfügbarkeit des Pkw ausgegangen. Mikroskopische Verkehrsmodelle erlauben es, neben dem Führerscheinbesitz auch die Beschränkungen der tatsächlichen Verfügbarkeit des Pkw zur Wahlsituation zu berücksichtigen – sei es durch Nutzungskonkurrenz im Haushalt oder vor allem im Verlauf der Wegekette. Systeme wie das Vehicle-on-Demand brechen diese Verfügbarkeitsbeschränkung systematisch auf – diese Art von Pkw kann theoretisch jederzeit von jeder Person als neue Verkehrsmitteloption gewählt werden. Ebenso wie bei der Abbildung von Carsharing-Systemen gilt es hier also nicht zuletzt, die räumlichen und sozialen Kriterien der Pkw-Verfügbarkeit bei der Modellierung zu überdenken.

Die Berücksichtigung von Raum- und Kontexteigenschaften sowie die Differenzierung der möglichen Einsatzzwecke oder Wegezwecke waren in Abschn. 12.3.2 als weitere Kriterien der Verkehrsmittelwahl in den Modellen aufgeführt worden. Insbesondere beim Nutzungsszenario des Valet-Parkens erschließt sich intuitiv die hohe Bedeutung des Raumes für die wahrgenommene Nützlichkeit der Option. Zwar ist der Detaillierungsgrad in den Nachfragemodellen in der Regel hoch genug, um Aussagen über die Siedlungsstruktur, die generelle Flächennutzungsstruktur oder auch die Bebauungsdichte treffen zu können. Die Bebauungsstruktur – nicht zuletzt ausschlaggebend dafür, ob genügend oder gar private Stellplätze vorhanden sind – ist in der Regel nicht abgebildet. Detaillierte Abbildungen der Verfügbarkeit von Parkplätzen, des Parkdruckes oder auch der damit assoziierten Kosten sowie der Zugangs- und Abgangszeiten stellen eine Seltenheit dar (s. Abschn. 12.3.2). Für eine adäquate Abbildung des Valet-Parkens lässt sich hier generell Handlungsbedarf feststellen.

Das Vehicle-on-Demand ist ebenfalls ein Beispiel, in dem die Raumstruktur maßgeblich über die Nutzung und die Konkurrenzsituation zu bestehenden Verkehrsmittelangeboten bestimmt wird. So gilt es im städtischen Raum vornehmlich als Alternative zum privaten Pkw, dem Taxi oder dem öffentlichen Verkehr, im ländlichen Raum wird es vor allem als

möglicher Zubringerdienst und somit als Ergänzung zum Angebot des öffentlichen Verkehrs gesehen. Die Aufgabe der Modellierung ist es somit, sinnvolle Umsetzungskonzepte und Verfügbarkeiten zu antizipieren und in die Abbildung des intermodalen Verkehrsangebotes zu integrieren. Weitere erstrebenswerte Verbesserungen bei der Abbildung des Verkehrsangebotes betreffen die Abbildung der Parksuchverkehre sowie die Identifikation der Streckenabschnitte, die vorrangig für den Einsatz entsprechender Automatisierungen geeignet sind.

Insbesondere das Nutzungsszenario des Vehicle-on-Demand macht deutlich, welche grundsätzlichen Auswirkungen autonome Fahrzeuge auf unseren Fahrzeugbesitz und damit unsere alltäglichen Mobilitätsentscheidungen haben könnten. Der Abbildung und Quantifizierung kausaler Zusammenhänge zwischen dem Besitz oder der Zugangsoption zu einem Fahrzeug und seinen wichtigsten Eigenschaften – beispielsweise Ausstattung mit Valet-Parken oder einer vollautomatischen Fahrfunktion – einerseits und den angebotsseitigen, räumlichen und soziodemografischen Eigenschaften des jeweiligen Haushaltes andererseits kommt damit eine verstärkte Bedeutung zu. Zwar wird die klassische Herangehensweise, lediglich den Besitz eines Durchschnittsautos als Eingangsgröße in die Modelle zu berücksichtigen, insbesondere unter dem Gesichtspunkt der Emissionsberechnung mehr und mehr durch vorgelagerte Modelle abgelöst, indem Antriebsart, Größenklasse, Preissegment, Anzahl der Sitzplätze oder Transportmöglichkeiten der in den Haushalten verfügbaren Pkw einbezogen werden. Unterstützungsfunktionen wie das Valet-Parken spielen dabei aber ebenso wenig eine Rolle wie die Alternative einer Carsharing-Mitgliedschaft oder die Abschaffung eines Pkw aufgrund einer guten Versorgung mit Verkehrsmittelalternativen. Doch nicht nur die Frage, wer den Besitz eines eigenen Autos durch das Leihen oder das Gefahrenwerden substituieren könnte, bleibt so mit den herkömmlichen Mitteln der Modellierung unbeantwortet. Ist davon auszugehen, dass insbesondere die Kombination aus eigenem Pkw und verschiedenen Vehicles-on-Demand eine flexible Anpassung des eingesetzten Fahrzeuges auf die jeweilige Nutzungssituation fördert, so zeigt sich auch hier dringlicher Bedarf bei der Erhebung entsprechender Daten, ihrer Analyse und der nachfolgenden Erweiterung der Modellierung.

---

## 12.7 Zusammenfassung und Ausblick

Es wird allgemein erwartet, dass autonome Fahrzeuge unterschiedlicher Ausprägung in naher Zukunft Teil unserer Alltagsmobilität sein werden. Die Integration entsprechender Verkehrsangebote in die Verkehrsmodellierung, eines der wichtigsten Instrumente der Planungspraxis, stellt daher gleichermaßen Notwendigkeit und Herausforderung dar: Bestehende empirische Arbeiten zu den erwarteten Auswirkungen zeigen sich bisher vorrangig technikorientiert; gleichzeitig ist der Blick in die Zukunft naturgemäß unsicherheitsbehaftet und die Wirkungsweise neuer Technologien nur schwer abzuschätzen.

Betrachtet man die einzelnen Nutzungsszenarien hinsichtlich ihrer möglichen Wirkungen auf die Verkehrsmittelwahl, so zeigt sich deutlich die Notwendigkeit der Differenzierung.

Sowohl das Valet-Parken als auch der Autobahnpiлот werden vorrangig mit einem geringfügig modifizierten „normalen“ Pkw verbunden, der in speziellen Situationen einen Vorteil bietet: beim Valet-Parken der verbesserte Zugang zum Pkw bzw. der Wegfall der Parkplatzsuche, beim Autobahnpiлот die optionale Abgabe der Fahrfunktion auf ausgewählten Strecken oder in speziellen Fahrsituationen. Mit der Einführung vollautomatisierter Fahrzeuge verbindet sich die Vorstellung einer substanziellen Verbesserung der Bewertung der Reisezeit im Fahrzeug und einer gleichzeitigen Senkung der Hindernisse für die Nutzung des Pkw. Tiefgreifende Auswirkungen auf das Gesamtverkehrssystem lassen sich vor allem für das Szenario einer weitreichenden Verfügbarkeit von Vehicles-on-Demand aufzeigen: Individualmobilität wird unabhängig von der Fahrertüchtigkeit oder dem Besitz eines Fahrzeuges möglich. Voraussichtlich wird dieses fahrerlose Carsharing in Städten neben einer deutlichen Senkung des Pkw-Besitzes zu einer Reduktion der Bringwege und der Taxinutzung führen; auf dem Land könnte es neue Zugänge zum öffentlichen Verkehr erschließen.

Mithilfe einer Onlinebefragung wurde untersucht, ob bzw. im Austausch gegen welche bisher genutzten Verkehrsmittel sich die Befragungsteilnehmer vorstellen könnten, ein autonomes Fahrzeug in der Form verschiedener Nutzungsszenarien zu nutzen. Neben einer generellen, mit der Konkretisierung in den einzelnen Szenarien sogar steigenden Nutzungsskepsis ist der große Einfluss der momentanen Einstellung zum Auto auffallend. Besonders starke Nutzungsrückgänge werden für das Taxi antizipiert. Spezifische Vorteile autonomer Fahrzeuge werden vor allem bei langen Fahrten und im Falle des Valet-Parkens im städtischen Kontext gesehen. Der Genuss der Fahrt und der Landschaft sowie die Unterhaltung mit Mitfahrenden sind momentan die bevorzugten Tätigkeiten in Nah- und Fernverkehr; mehr als zwei Drittel geben an, nie unterwegs zu arbeiten. Während der Autofahrt gehören das Musikhören und die Unterhaltung zu den am weitesten verbreiteten Aktivitäten. Bei der Frage nach der zukünftigen Zeitnutzung beim automatisierten Fahren stehen auch hier Landschaftsgenuss und Unterhaltung im Vordergrund der Nennungen.

Nicht alle Faktoren, die sich als maßgeblich für die Bewertung autonomer Fahrzeuge erweisen, lassen sich in Verkehrsmodellen mit ihrer vereinfachten Darstellung der Kausalzusammenhänge bei der Verkehrsentstehung abbilden. Insbesondere nicht-rationale, „weiche“ Wahrnehmungs- und Bewertungsfaktoren wie der Fahrspaß oder aber der Wunsch bzw. die Ablehnung, die Fahraufgabe abzugeben, lassen sich empirisch nur schwer und aufwendig fassen und in Modellen berücksichtigen. Sowohl die empirische Basis als auch die modellseitige Umsetzung zeigen hier Erweiterungsbedarf und -potenziale.

Die hauptsächliche Herausforderung bei der Integration autonomer Fahrzeuge liegt jedoch in der bisher nur rudimentären Unterscheidung des „Autos“ in den Modellen. Auch hier gilt es, empirische Grundlagen ebenso wie die Abbildungsmöglichkeiten in den Modellen zu verbessern und gleichzeitig die Rolle der Fahraufgabe und des Fahrzeugbesitzes bei der Verkehrsmittelwahl zu unterstreichen. Ziel ist, eine deutlichere Unterscheidung zwischen Fahren und Gefahrenwerden, einem vollständig automatisierten und einem nur bei Wunsch unterstützenden Fahrzeug, dem eigenen und einem geliehenen Pkw oder auch einem Taxi zu ermöglichen. Hier offenbart sich zeitgleich die Notwendigkeit, Fahrzeugbesitz als feste Inputgröße in der Modellierung zu überdenken.



Die Möglichkeit einer geänderten Zeitnutzung ist neben der Sicherheit einer der meistgenannten Vorteile einer Automatisierung des Fahrens. Gleichzeitig wirken Zeitkosten als Haupttreiber bei der Verkehrsmittelwahl in Verkehrsnachfragemodellen. Modellseitig ist bisher allerdings in der Regel keine Unterscheidung der Reisezeit vorgesehen. Unterscheidungen zwischen „sinnvoll“ und „nutzlos“ verbrachter Zeit, zwischen aktivem Fahrspaß oder lästigem Staustehen, zwischen produktiver Arbeit oder entspannendem Musikhören sind derzeit nicht möglich. Eine derartige Erweiterung der Modelle ist im Prinzip nicht schwierig – zunächst unabhängig davon, welche Alternativbetätigung tatsächlich angestrebt wird. Doch wird erneut deutlich, dass die empirische Basis, auf der die Modellierung aufbaut, zu große Lücken aufweist, um eine adäquate Abbildung automatisierten Fahrens gewährleisten zu können.

---

## Literatur

1. Autoscout 24: Unser Auto von morgen: Studie zu den Wünschen der Europäer an das Auto von morgen. (2012)
2. Bamberg, S., Hunecke, M., Blöbaum, A.: Social context, personal norms and the use of public transportation: Two field studies. *J. Environ. Psychol.* 27, 190–203 (2007)
3. Becker, J.: Fahrplan in die Zukunft, *Süddeutsche Zeitung*, 18.1.2014, S.40. (2014)
4. Bhat, C.R., Sardesai, R.: The impact of stop-making and travel time reliability on commute mode choice. *Transp. Res. Part B Methodol.* 40, 709–730 (2006)
5. Bates, J.J.: History of Demand Modelling. In: Hensher, D.A. and Button, K.J. (eds.) *Handbook of Transport Modelling*. pp. 11–34. Elsevier (2012)
6. Buehler, R.: Determinants of transport mode choice: a comparison of Germany and the USA. *J. Transp. Geogr.* 19, 644–657 (2011)
7. Castiglione, J., Bradley, M., Gliebe, J.: *Activity-Based Travel Demand Models : A Primer*. (2014)
8. Continental: *Continental Mobilitätsstudie 2013*. (2013)
9. Cervero, R., Kockelman, K.: Travel demand and the 3Ds: Density, diversity, and design. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 2, 199–219 (1997)
10. Davidson, W., Donnelly, R., Vovsha, P., Freedman, J., Ruegg, S., Hicks, J., Castiglione, J., Picado, R.: Synthesis of first practices and operational research approaches in activity-based travel demand modeling. *Transp. Res. Part A Policy Pract.* 41, 464–488 (2007)
11. Fagnant, D.J., Kockelman, K.M.: *Preparing a Nation for Autonomous Vehicles: Opportunities, Barriers and Policy Recommendations*. Eno Cent. Transp. (2013)
12. Flade, A., Wullkopf, U.: *Theorien und Modelle zur Verkehrsmittelwahl*. Darmstadt (2002).
13. Giesel, F., Lenz, B.: *Wirkung von E-Car-Sharing-Systemen auf Mobilität und Umwelt in urbanen Räumen*, unveröffentlichte WiMobil-Projektpräsentation. (2014)
14. Giesel, F., Nobis, C., Lenz, B.: *Carsharing as a Driver of Sustainable Urban Mobility? An Analysis of User Structure and Motivation*, unveröffentlichte Präsentation auf der AAG Conference in Tampa, USA. (2014)
15. Glotz-Richter, M., Loose, W., Nobis, C.: Car-Sharing als Beitrag zur Lösung von städtischen Verkehrsproblemen. *Int. Verkehrswes.* 59, 333–337 (2007).
16. Kahneman, D., Krueger, A.B.: Development in the Measurement of Subjective Well-Being. *J. Econ. Perspect.* 20, 3–24 (2006)
17. KPMG: *Self-Driving Cars: Are We Ready?* (2013)

18. Kutter, E.: Modellierung für die Verkehrsplanung. Theoretische, empirische und planungspraktische Rahmenbedingungen. ECTL Working Paper 21, TU Hamburg-Harburg. (2003)
19. Litmann, T.: Ready or waiting? *Traffic Technol. Int.* 37–42 (2014)
20. Maier, G., Weiss, P.: Modelle diskreter Entscheidungen: Theorie und Anwendung in den Sozial- und Wirtschaftswissenschaften. Springer (1990)
21. Nally, M.G., Rindt, C.: The activity-based approach. In: Hensher, D.A. and Button, K. (eds.) *Handbook of Transport Modelling*. pp. 53–69. Elsevier (2012)
22. McNally, M.G.: The Four-Step Model. In: Hensher, D.A. and Button, K. (eds.) *Handbook of Transport Modelling*. pp. 35–54. Elsevier (2012)
23. Munsch, E.: Autonomes Fahren: Platz sparen mit dem Bordcomputer, <http://www.zeit.de/mobilitaet/2014-05/autonomes-fahren-feldversuch-schweden>. (2014). Letzter Zugriff 28.6. 2014
24. Ortúzar, J., Willumsen, L.G.: *Modelling Transport*, 3. Auflage. Wiley, Chichester (2005)
25. Ory, D.T., Mokhtarian, P.L.: When is getting there half the fun? Modeling the liking for travel. *Transp. Res. Part A Policy Pract.* 39, 97–123 (2005)
26. Rinspeed: Rinspeed – Creative think tank for the automotive industry. Where the future is reality – today. <http://www.rinspeed.eu/aktuelles.php?aid=15>. (2014). Letzter Zugriff 28.6. 2014
27. Scheiner, J., Holz-Rau, C.: Travel mode choice: affected by objective or subjective determinants? *Transportation (Amst)*. 34, 487–511 (2007)
28. Scheiner, J., Holz-Rau, C.: Gendered travel mode choice: a focus on car deficient households. *J. Transp. Geogr.* 24, 250–261 (2012)
29. Schwanen, T., Banister, D., Anable, J.: Rethinking habits and their role in behaviour change: the case of low-carbon mobility. *J. Transp. Geogr.* 24, 522–532 (2012)
30. Silberg, G., Wallace, R., Matuszak, G.: Self-driving cars: The next revolution. KPMG and Center for Automotive Research. (2012)
31. Simma, A., Axhausen, K.W.: Commitments and Modal Usage: Analysis of German and Dutch Panels. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board.* 1854, 22–31 (2003)
32. Sokolow, A.: Autonome Autos: Autobranche vs. Google, <http://m.heise.de/newsticker/meldung/Autonome-Autos-Autobranche-vs-Google-2072050.html>. (2013). Letzter Zugriff 28.6.2014
33. Steg, L.: Car use: lust and must. Instrumental, symbolic and affective motives for car use. *Transp. Res. Part A Policy Pract.* 39, 147–162 (2005)
34. Train, K.E.: A comparison of the predictive ability of mode choice models with various levels of complexity. *Transp. Res. Part A Gen.* 13, 11–16 (1979)
35. Walker, J.L.: Beyond Rationality in Travel Demand Models. *ACCESS Mag.* 1, <https://escholarship.org/uc/item/1x04f3k3>. (2011). Letzter Zugriff 28.6.2014
36. Wardman, M.: Public transport values of time. *Transp. Policy.* 11, 363–377 (2004)
37. Willumsen, L.G.: Forecasting the impact of Self-Driving-Cars. What to do about them in our models and forecasts. Vortrag auf der 2013 Citilab Asia User Conference, Karon, Thailand, unveröffentlicht. (2013)

Hermann Winner, Walther Wachenfeld

## Inhaltsverzeichnis

<b>13.1 Einleitung</b> .....	266
<b>13.2 Autobahnavtomat und Vollautomat mit Verfügbarkeitsfahrer</b> .....	268
13.2.1 Auswirkungen auf das Karosseriekonzept .....	269
13.2.2 Auswirkungen auf das Antriebskonzept .....	269
13.2.3 Auswirkungen auf das Fahrwerkskonzept .....	270
13.2.4 Auswirkungen auf den Innenraum und die Mensch-Maschine-Interaktion .....	271
<b>13.3 Autonomes Valet-Parken</b> .....	272
<b>13.4 Vehicle-on-Demand</b> .....	272
13.4.1 Auswirkungen auf das Karosseriekonzept .....	273
13.4.2 Auswirkungen auf das Antriebskonzept .....	274
13.4.3 Auswirkungen auf das Fahrwerk .....	275
13.4.4 Auswirkungen auf den Innenraum und die Mensch-Maschine-Schnittstelle .....	279
<b>13.5 Use-Case-Gesamtbetrachtung</b> .....	280
<b>13.6 Fahrzeugübergreifende Änderungen</b> .....	281
<b>13.7 Folgekonzepte</b> .....	282
<b>13.8 Zusammenfassung und Ausblick</b> .....	283
<b>Literatur</b> .....	284

---

H. Winner (✉)

Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Fahrzeugtechnik – FZD, Deutschland  
winner@fzd.tu-darmstadt.de

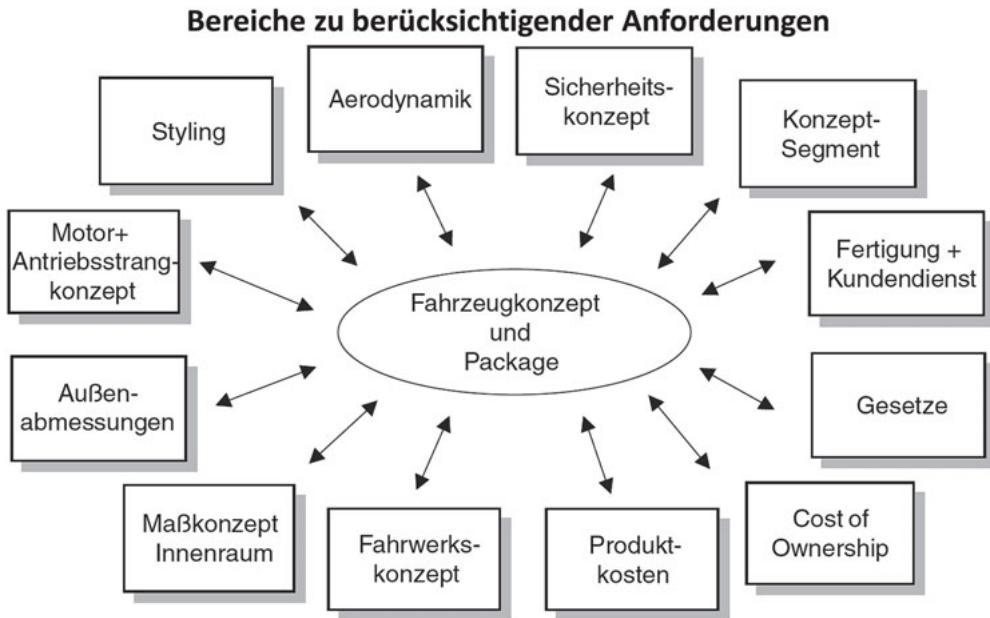
W. Wachenfeld

Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Fahrzeugtechnik – FZD, Deutschland  
wachenfeld@fzd.tu-darmstadt.de

## 13.1 Einleitung

Nach der Erfindung des Automobils durch Carl Benz im Jahr 1886 haben sich zum Teil sehr unterschiedliche Fahrzeugkonzepte gebildet. Einiges ist als konsequente Weiterentwicklung und Ablösung vorheriger Konzepte zu sehen, wie die Abkehr vom Kutschen-Design und die Integration der Räder und des Fahrwerks unterhalb der Karosserie oder die selbsttragende Karosserie. Als Haupteinfluss auf das Fahrzeugkonzept kann der Einsatzzweck betrachtet werden, der besonders deutlich wird, wenn Nutzkraftfahrzeuge mit einbezogen werden. Aber auch im Bereich der Personenkraftwagen hat sich eine Vielfalt entwickelt, von Lifestyle geprägten Cabrios und SUV bis hin zu Allzweckfahrzeugen mit Stufen- und Fließheck sowie Kombis und (Mini)Vans. Der Nutzungszweck steht bei Kleinlieferwagen, Kleinbussen und auf anderen Märkten bei den sogenannten Light-Trucks noch stärker im Vordergrund. Unter der Haube haben sich die Antriebskonzepte nach einer Dominanz von Verbrennungskraftmaschinen, zumeist in Form von längseingebauten Motoren mit Hinterradantrieb, in den letzten Dekaden zu einem immer größeren Teil in Richtung quereingebaute Frontmotoren mit Vorderradantrieb verschoben. Weiterführend stellt die Elektrifizierung des Antriebsstrangs einen aktuellen Trend dar, der durch CO<sub>2</sub>-Vorgaben, geringere Geräuschbelastung und weitere Vorteile zukunftsfähig erscheint. Trotz aller Verschiebungen der Anteile ist ein „Aussterben“ bestehender Antriebskonzepte nicht zu erwarten, da die Divergenz der Optimierungsziele unterschiedlicher Marktsegmente diese Diversifizierung der Konzepte weiterhin tragen wird. So stellt ein ländlicher Bereich in den USA gravierend andere Anforderungen an den Antrieb als eine chinesische Großstadt.

Zu der auf dem Markt befindlichen Fahrzeugmodellvielfalt gesellt sich die Konzeptvielfalt der „Show Cars“, die auf Automobilmessen präsentiert wird. Nur in wenigen Fällen spielen Assistenzsysteme und Teilautomatisierung bei den bekannten Fahrzeugen eine konzeptändernde Rolle. Die in den letzten Jahren erkennbare Tendenz zur geringeren Übersichtlichkeit der Fahrzeuge, die durch Stylinganforderungen und/oder Anforderungen an die Steifigkeit der Karosserie begründet wird, fördert jedoch den Einsatz von kompensierenden Systemen wie Ultraschall-Einparkhilfe, Rückfahrkamera oder Surround-View-Darstellung. Zumeist besitzen Fahrerassistenzsysteme aber keine konzeptändernde Rolle, da nur wenige in der Baureihen-Serienausstattung enthalten sind. Somit verbleibt für den Fahrzeughersteller die Anforderung, das Fahrzeug so zu entwickeln, dass auch nicht ausgerüstete Fahrzeuge sicher durch den Fahrer geführt werden können. Da zudem darauf zu achten ist, dass bei teilautomatisiertem Fahren die Übernahmereitschaft und -fähigkeit [1] beim Fahrer vorausgesetzt wird, ist nicht mit großen Änderungen gegenüber herkömmlichen Fahrzeugen zu rechnen. Lediglich Konzepte, die eine Übernahme begünstigen, wie z. B. neue Mensch-Maschine-Schnittstellen für die Beauftragung einer teilautomatischen Funktion, könnten Einzug halten [2]. Frühere, aber auch noch aktuelle Drive-by-Wire-Konzepte mit alternativen Bedienelementen (vgl. [3]) beschränkten sich auf den Ersatz der Lenkrad- und Pedalfunktion, ohne eine Automatisierung höherer Fahrzeugführungsebenen, die zum automatisierten Fahren unverzichtbar sind, konzeptionell vorzusehen.



**Abb. 13.1** Anforderungsbereiche für eine Konzeptentscheidung [4]

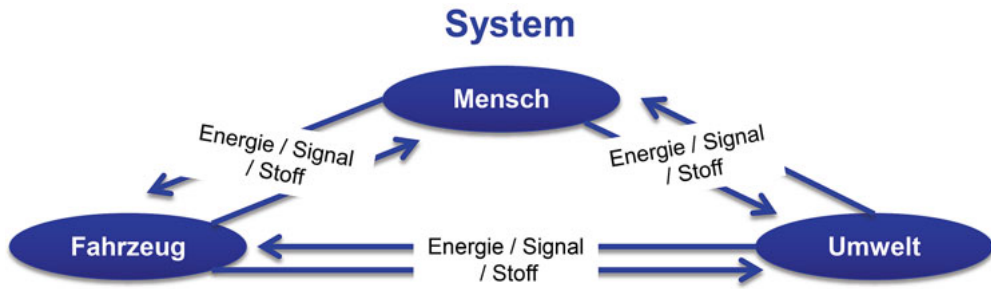
Auch wenn bisher noch kein Trend zu einem anderen Konzept aufgrund der höheren Automatisierung festzustellen ist, kann bei einer erheblichen Änderung der Fahrzeugführung dies anders aussehen. Daraus leitet sich die Frage ab: Bringt die Möglichkeit des autonomen Fahrens die aktuelle Konzeptwelt der Automobile durcheinander, sei es durch starke Verschiebung der Marktanteile oder durch neue Konzepte?

Bevor auf die Frage weiter eingegangen wird, soll eine Abgrenzung der konzeptbestimmenden Merkmale erfolgen, damit eine gleichmäßige, das Gesamtfahrzeug betreffende Ebene geschaffen wird und die nochmals vielfältigere Welt der Detaillösungen ausgeblendet werden kann. Dabei sind zuvor die Anforderungen zu identifizieren, die später die Konzeptauswahl dominieren werden.

In Abb. 13.1 ist eine Auswahl von Bereichen dargestellt, aus denen sich die Anforderungen ergeben. Viele der Anforderungen sind physikalisch – oftmals konfliktionär – verknüpft und nur über einen Abwägungs- und Priorisierungsprozess miteinander vereinbar, wie z. B. eine stromlinienförmige Aerodynamik im Gegensatz zu markanten Stylingkomponenten.

Für die hier beabsichtigte Diskussion der obersten Konzeptebene werden die Konzepte hinsichtlich

- Karosserie,
- Antrieb,
- Fahrwerk,
- Innenraum,
- Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS)



**Abb. 13.2** Systembetrachtung Fahrer-Fahrzeug-Umwelt

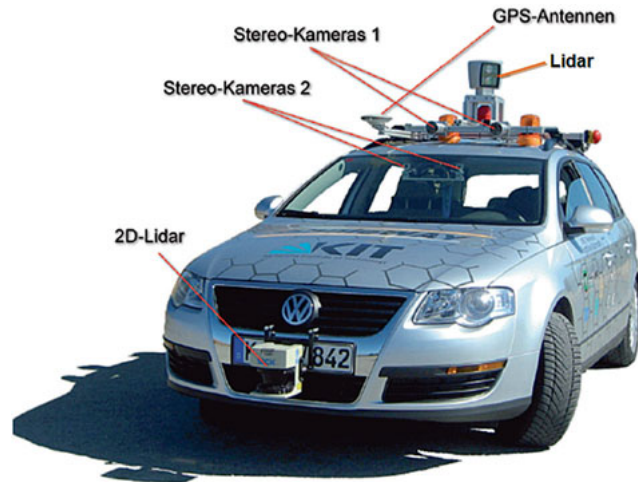
unterschieden. Als Baugruppen des Fahrzeugs stehen diese immer in einem Zusammenhang zum Insassen und der Umwelt, insbesondere dem Umfeld Straße. Die Interaktion zwischen diesen Bereichen kann abstrakt als Austausch von Stoff, Energie und Signal dargestellt werden (s. Abb. 13.2). Da die Fahrzeugautomatisierung diesen Austausch grundlegend verändert, werden auch die Baugruppen beeinflusst. Ein Beispiel der Automatisierungsauswirkung ist der Signalaustausch zwischen Umwelt und Mensch. Der Insasse muss nun nicht mehr der Fahraufgabe nachgehen und benötigt dementsprechend auch keinen Signalaustausch mit der Umwelt, um sein Fahrtziel zu erreichen. Dieser auf dem Austausch von Stoff, Energie und Signal basierende Ansatz ermöglicht eine weitere Strukturierung der Analyse unter Berücksichtigung der Schnittstellen.

Im Folgenden werden diese konzeptbestimmenden Bereiche und ihre Schnittstellen für die in Kap. 2 ausgewählten Use-Cases und die damit möglichen Anwendungsszenarien im Einzelnen betrachtet.

## 13.2 Autobahnautomat und Vollautomat mit Verfügbarkeitsfahrer

Obwohl sich die zwei Use-Cases „Autobahnautomat“ und „Vollautomat“ in ihrer Leistungsfähigkeit bezüglich der autonomen Fahrt deutlich unterscheiden, lassen sich hinsichtlich der Fahrzeugkonzeptüberlegungen keine Unterschiede finden, da beide Use-Cases an einen Verfügbarkeitsfahrer gebunden sind. Beim Use-Case „Vollautomat“ kann der Einsatzbereich der autonomen Fahrt ausgedehnter sein und verlangt seltener eine Übernahme. Aber in beiden Fällen muss gewährleistet sein, dass eine Fahrzeugführung durch einen fahrberechtigten Menschen in seiner Funktion als Verfügbarkeitsfahrer ohne Einschränkung möglich ist. Damit ist für beide Fälle die Fahrzeugführung als „Mischbetrieb“ – autonom oder manuell – zu unterstützen.

**Abb. 13.3** Umfeldsensorik Versuchsfahrzeug Team Anyway [5]



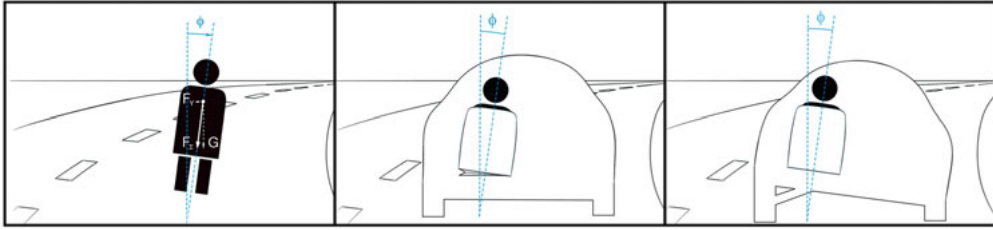
### 13.2.1 Auswirkungen auf das Karosseriekonzept

Für die weiterhin vorgesehene manuelle Fahrzeugführung ist keine konzeptbestimmende Änderung gegenüber den zu erwartenden Vergleichskonzepten, die keine Fähigkeit zum autonomen Fahren vorsehen, erkennbar. Solange das sogenannte Erweiterungs- und Verfügbarkeitskonzept (s. Kap. 2) auf der Regelung durch den Fahrer basiert, beschränkt dies die Freiheitsgrade des Karosseriekonzepts. Die Außenmaße des Fahrzeugs sowie die Anordnung und Größen der Scheiben müssen dann auch weiterhin dem Fahrer angepasst werden, sodass entsprechend ähnliche Ausführungen wie heutzutage erwartet werden.

Als Voraussetzung für das autonome Fahren ist eine Sensorik für nahezu alle Sichtrichtungen gefordert, die sicherlich zu im Detail aufwendigen Package-Lösungen führen mag, wenn wie bisher eine nur dezente Sichtbarkeit angestrebt wird. Sollte tatsächlich ein Zeichen für die Fähigkeit, autonom zu fahren, gesetzt werden, so käme das den Entwicklern zugute, um im wahrsten Sinne des Wortes herausragende Sensorpositionen besetzen zu können (s. als Beispiel Abb. 13.3). Ansonsten ist keine größere Abweichung des Fahrzeugkonzepts zu Vergleichsfahrzeugen zu erwarten, da mit diesen Use-Cases den bestehenden Konzepten „nur“ ein neues Feature hinzugefügt wurde, ohne die Grundbestimmung des Fahrzeugs oder des Einsatzbereiches zu berühren.

### 13.2.2 Auswirkungen auf das Antriebskonzept

Für die potenziell verbleibenden manuellen Fahrtanteile gibt es keinen Grund, das Antriebskonzept anders zu bewerten als für vergleichbare, nicht autonome Fahrzeuge. Allerdings vereinfacht die autonome Fahrt gegenüber der manuellen Fahrt eine Einbindung in die Verkehrstelematik, und somit wird eine effizientere Fahrt möglich. Die Fahrweise kann



**Abb. 13.4** Neigekonzept bei Kurvenfahrt: links: Addition der Kräfte, die auf Insassen wirken; Mitte: Sitzneigung; rechts: Neigung mittels Fahrwerk

je nach Zeit- oder Energiebedarf gesteuert werden. Grundsätzlich stehen diese Möglichkeiten bereits den Fahrzeugen mit Teil- oder Hochautomatisierung zur Verfügung, sodass sich kaum relevante Änderungen im Antriebskonzept wegen des weiteren Schritts zum autonomen Fahren ergeben. Es sind eher die neuen Vernetzungsmöglichkeiten, die Antriebskonzepten mit geringerer Gesamtverfügbarkeit, wie den batterieelektrischen Antrieben, zugutekommen.

### 13.2.3 Auswirkungen auf das Fahrwerkskonzept

Während für die manuelle Fahrt ein Fahrwerk mit üblichen Anforderungen benötigt wird, ermöglichen lange Phasen der autonomen Fahrt die Entkopplung des oder der Insassen vom Fahrgeschehen. Die Automatisierung benötigt weder das „Popometer“ für die Fahrdynamik, noch die Quer- und Längskraftwirkung, die mit der Fahrzeugbeschleunigung auf den Insassen wirkt. Sie kann auf die bewegungserfassenden Sensoren, die schon seit Langem für die elektronische Stabilitätsregelung verwendet werden, zurückgreifen, um die Trajektorie sowohl dynamisch als auch komfortabel zu regeln.

Ein Neigefahrwerk, wie im schienenengebundenen Verkehr schon lange bekannt, könnte zumindest die üblichen moderaten Querbewegungen von  $1\text{--}2\text{ m/s}^2$  kompensieren, wozu Gesamtneigungswinkel von etwa  $6^\circ\text{--}12^\circ$  benötigt werden. Dieser Gesamtneigungswinkel lässt sich durch den Neigungswinkel der Fahrbahn, den Fahrzeugaufbauwankwinkel und den Sitzwinkel darstellen (s. Abb. 13.4). Für die Seitenkraftkompensation erscheint es möglich, diese allein durch das Fahrwerk zu realisieren, wie die 2014 erfolgte Markteinführung im S-Klasse Coupé-Modell von Mercedes-Benz in ersten Zügen zeigt. Die für die Längskraftkompensation notwendigen Ein- und Ausfederungen betragen hingegen mehr als das Doppelte des heutigen Ein- bzw. Ausfederwegs. Wollte man auch hier eine Kompensation im genannten Bereich erreichen, kann dies nur mit einer (alleinigen oder zusätzlichen) Sitzverkipfung realisiert werden.

So faszinierend der Gedanke einer längs- und querkraftfreien Fahrt insbesondere für Ruhezeiten auch sein mag, so problematisch wird er bei gewünschter visueller Anknüpfung des Menschen an die Umwelt werden, da dann der visuelle Eindruck nicht mehr mit dem kinästhetischen und vestibularen Eindruck übereinstimmt. Aber selbst bei visueller Ent-



kopplung kann die Drehbeschleunigung, die im Vestibularorgan sensiert wird, zu Unwohlsein führen, da sie im Gegensatz zur translatorischen Beschleunigung nicht kompensiert werden kann, sofern die Fahrgastzelle nicht gegenüber der Fahrzeugrichtung drehbar ist. Darüber hinaus ist die Neigungsverstellung nicht ohne Drehraten und -beschleunigungen durchzuführen, wodurch die Neigedynamik stark herabgesetzt wird. So wäre bei einer Wahrnehmungsgrenze für die Drehbeschleunigung (Rollen) von  $4 \text{ }^\circ/\text{s}^2$ , wie sie aus Experimenten heraus bestimmt wurde [6, 7], der Zielwinkel für die Beschleunigungskompensation erst nach etwa 2,5 s erreicht. Dies kann bei einer sehr vorausschauenden autonomen Fahrweise ohne externe Störgrößen, wie z. B. andere Fahrzeuge, auf die mit höheren Beschleunigungsänderungen reagiert werden muss, in der Trajektorienplanung gerade noch berücksichtigt werden. Die verwendete Wahrnehmungsgrenze ist das Ergebnis eines Experiments und somit abhängig von dem zugrunde liegenden Testaufbau. Andere Experimente liefern abweichende Werte abhängig von dem entsprechenden Testaufbau, der Drehachse sowie der Testperson ( $0,3\text{--}6 \text{ }^\circ/\text{s}^2$ ). Eine Zusammenstellung unterschiedlicher Studien zu diesem Thema ist in [7, 9] zu finden.

Leichter erscheint es, die Beeinträchtigung durch vertikale Kräfte auszugleichen. In Kombination mit der Frontumfeldsensorik sollte ein Sänftengefühl möglich werden, das gegebenenfalls für sicherheitsrelevante Manöver abgeschaltet wird, um der Fahrdynamik Priorität einzuräumen. Elektronisch gesteuerte Luftfederkonzepte mit Verstelldämpfern oder vollaktive elektromechanische Feder-Dämpfereinheiten könnten die Basis für eine solche Sänfte sein. Dabei sind zur Vermeidung von niederfrequenten Nickbewegungen, ursächlich für die „Seekrankheit“, entsprechende Vorkehrungen in der Regelung zu treffen.

### **13.2.4 Auswirkungen auf den Innenraum und die Mensch-Maschine-Interaktion**

Durch die Notwendigkeit des Verfügbarkeitsfahrers muss immer ein Fahrerarbeitsplatz zur Verfügung stehen. Daher wird die Einrichtung des Innenraums davon geprägt sein, dass in der vorderen Reihe ein instrumentierter Platz bereitsteht. Somit sind keine größeren Innenraumkonzeptveränderungen im Rahmen der hier betrachteten Use-Cases (Autobahnautomat und Vollautomat) zu erwarten. Alternativ zur heute bekannten Fahrzeugsteuerung durch den Menschen per Lenkrad und Pedale kann ein alternatives Steuerungskonzept implementiert sein, das auf teilautomatisierte Grundfunktionalitäten aufsetzt, womit auch andere, platz sparende Bedienelemente verbunden sein können. Ansonsten findet sich bei mehreren Konzeptfahrzeugbeispielen die Möglichkeit, die Bedienelemente, im Besonderen das Lenkrad, an einen weniger störenden Platz zu bewegen, womit bei der autonomen Fahrt der Raum vor dem Fahrer für das „Alternativprogramm“ zur Verfügung steht. Eventuell ist auch eine Art Verriegelung der Betätigungselemente notwendig, damit nicht aus Versehen auf die Betätigungselemente zugegriffen wird und eine unbeabsichtigte Übernahme stattfindet.

Neben der Nutzung des Fahrerarbeitsplatzes als mobiles Büro zum Arbeiten oder als Medienplattform zur Unterhaltung ermöglicht die autonome Fahrt die Nutzung der Fahrzeit zur Erholung oder zur Kommunikation mit Mitfahrern. Entsprechend lassen Fahrzeuge bei diesem Use-Case erwarten, dass die Sitzkonzepte den jeweiligen Bedürfnissen Rechnung tragen, wobei vieles schon in heutigen Fahrzeugen, wenn auch nicht für den Fahrersitz, verwirklicht wurde.

---

### 13.3 Autonomes Valet-Parken

Das autonome Valet-Parken kann für Privat-Pkw das Parkplatzproblem im Wohnbereich oder an der Arbeitsstätte lösen helfen und für Carsharing-Nutzer die bisher als lästig empfundene Strecke vom Carsharing-Stellplatz zum gewünschten Einsteige- oder vom Aussteigeort überbrücken (s. Kap. 9). Außerhalb dieser Nutzung bleibt das Fahrzeug ein ganz „normales“ Fahrzeug, das die vorhandenen Fähigkeiten für assistierendes oder teil- bzw. hochautomatisiertes Fahren zur Verfügung stellen wird.

Wenn keine Insassen oder Gegenstände mehr in einem Fahrzeug vorhanden sind, besteht die Möglichkeit, den Freiraum im Fahrzeug durch ein variables Karosseriekonzept zu nutzen. Bereits heute existieren Konzepte mit dieser Funktion, die eine Reduktion der Ausmaße eines Fahrzeugs während des Parkens vorsehen. Allerdings sind den Autoren keine Serienanwendungen bekannt, da vermutlich die Anforderungen an eine hohe passive Sicherheit nicht mit den Anforderungen an eine variable Karosserie zusammenpassen. Das autonome Valet-Parken kann zwar durch vergünstigte Abstelltarife eine derartige platzsparende Option bevorzugen, umgekehrt aber auch den Druck auf eine platzeffiziente Unterbringung reduzieren, da der Weg zu einem großen Parkplatz ohne Kosten- und Zeitdruck nun automatisch bewältigt wird. Ob dabei der Kraftstoffverbrauch für den Weg zum Parkplatz höher ausfällt als der für den Parksuchverkehr, lässt sich im Voraus schlecht abschätzen.

Ansonsten folgen aus dem autonomen Valet-Parken keine weiteren grundlegenden Freiheitsgrade für das Fahrzeugkonzept.

---

### 13.4 Vehicle-on-Demand

Mit dem Use-Case Vehicle-on-Demand ist ein vollständig fahrerloses Fahrzeug gemeint, das keinen Fahrerarbeitsplatz zur Verfügung stellt und auf die Fahrerfähigkeiten nicht mehr zurückgreifen kann. Dadurch ergeben sich neue Freiheitsgrade für die Konzeption dieser Fahrzeuge, die im Folgenden für diesen Use-Case beschrieben werden. Da das Konzept eine Nutzung gegenüber Besitz favorisiert, ist davon auszugehen, dass die Nutzer das Fahrzeug in den meisten Fällen weder besitzen noch Halterverantwortung für das Fahrzeug übernommen haben. Stattdessen stellen Dienstanbieter diese Fahrzeuge für Mobilitätsdienstleistungen bereit (s. Kap. 9).

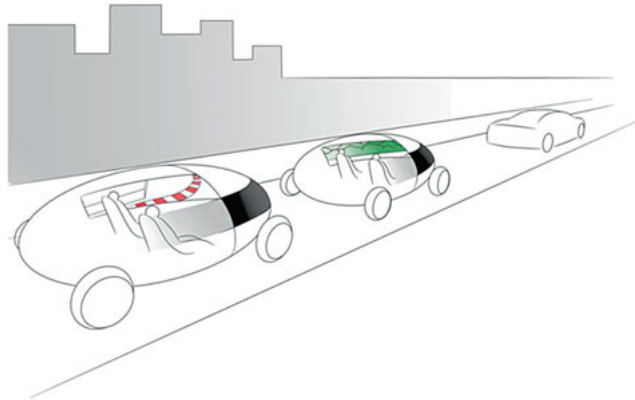
### 13.4.1 Auswirkungen auf das Karosseriekonzept

Bei dem nahezu alle Einsatzbereiche umfassenden Use-Case mit Fahrgeschwindigkeiten bis zu 120 km/h muss die Karosserie den Insassen Wetter- und Aufprallschutz bieten, der dem heutiger Automobile entspricht. Damit sind maßgebliche Konzept einschränkungen verbunden. Ein geschlossener Fahrgastraum, möglicherweise mit Cabriodach, ist aus Wetterschutzgründen nötig. Zusätzlich ist für die Passagiere des Fahrzeugs eine sichere Hülle mit Rückhaltmöglichkeit vorzusehen, um die gleiche passive Sicherheit wie in heutigen Fahrzeugen mit Sitzgurt und Airbag zu gewährleisten. Diese Forderung besteht, solange keine vollständige, unfallfreie Betriebssicherheit des Straßenverkehrs gegeben ist, was zumindest im Mischverkehr mit Driver-only-Fahrzeugen derzeit nicht absehbar ist. Die Form des Fahrzeugs kann abhängig von Zweck und Zielgruppe heutigen Automobilen entsprechen, womit eine große Vielzahl von Varianten möglich ist. Die größte Raumökonomie bieten One-Box-Cars, die einem Quader gemäß ohne Absenkungen im vorderen oder hinteren Fahrzeugbereich auskommen. Natürlich werden sich die Designer bemühen, die jeweils gewählte Form so zu präsentieren, dass die Kundschaft passend angesprochen wird. Allerdings ist bei der Vielzahl der Einsatzmöglichkeiten eines Vehicle-on-Demand-Konzepts noch weitgehend offen, worauf das Styling zielen wird, insbesondere wie viel individuelle Emotionalität bedient werden muss. Ein Blick in die Historie der Straßenfahrzeuge zeigt, dass für nahezu jedes Karosseriekonzept Beispiele existieren, die als ästhetisch gelungen oder misslungen angesehen werden. Daher wird hier allein aus der Formgebung kein Trend vorhergesagt. Aber allen Fahrzeugen, deren Nutzungsbereich höhere Geschwindigkeiten als die hier angegebenen 120 km/h einschließt, werden aerodynamisch nach dem Stand der Technik geformt sein und allein schon deshalb Abrundungen sowie aerodynamisch bedingte Verjüngungen und Abrisskanten aufweisen müssen [10].

Die Hülle um die Passagiere hat neben der Schutzfunktion auch die Kopplung an die Umwelt zu übernehmen. Grundsätzlich besteht die Möglichkeit der vollständigen Entkopplung, da keine Fahrersicht gewährleistet werden muss. Dies ermöglicht die von visuellen oder akustischen Störungen nahezu freie und private Nutzung der Kabine zu Unterhaltungs- und Erholungszwecken. Allerdings können die fahrdynamischen Einflüsse nur mit Einschränkungen isoliert werden, wie in Abschn. 13.2.3 und Abschn. 13.4.3 dargelegt wird. Es bleibt immer eine Herausforderung, die Stimmigkeit zwischen den Sinneseindrücken zu garantieren, da ansonsten Unwohlsein bis hin zur Übelkeit folgt, die kaum zur Akzeptanz solcher Isolationskonzepte führen wird. Abbildung 13.5 zeigt auf, wie eine solche vollständige Entkopplung während der Fahrt im öffentlichen Straßenverkehr aussehen würde.

Die Spanne der alternativen Beschäftigungen, die durch eine solche Entkopplung ermöglicht würde, ist groß und reicht vom Lesen in erholsamer „Umgebung“ (rechtes Fahrzeug) bis hin zu spannender Unterhaltung auf Rennstrecken (linkes Fahrzeug). Auch für die künstliche Darstellung der Umgebung bleibt die Herausforderung bestehen, die Stimmigkeit zwischen den Sinneseindrücken zu gewährleisten. Eine Wahlmöglichkeit über den Grad der Entkopplung über im einfachen Fall mechanisch betätigte Abdeckungen (Jalousien) oder über Hightech-Lösungen wie elektrochrome Scheiben erleichtert die

**Abb. 13.5** Entkopplung der Passagiere vom realen Straßenverkehr



Kompromissfindung auf jeden Fall. Auch eine virtuelle Umweltkopplung über Kamera-Livebilder der Umgebung, die eingespielt werden können (Bildschirme, Projektion), ist denkbar, verlangt aber ein hohes Vertrauen der Passagiere in die Zuverlässigkeit der Technik. Die Fahrt in einem autonomen Fahrzeug sollte nicht mit der Furcht verbunden sein, dass man, wenn auch nur zeitweise, einer Isolationszelle ohne Umweltkontakt ausgesetzt werden könnte. Einen Mittelweg zwischen virtueller und realer Welt stellt die Anreicherung der Umweltinformation im Sinne einer „Augmented Reality“ dar, bei der z. B. kontaktanalog Hinweise auf Sehenswürdigkeiten eingeblendet werden.

### 13.4.2 Auswirkungen auf das Antriebskonzept

Allein aus dem Use-Case lassen sich keine Einschränkungen für den Antrieb ableiten. Sowohl klassische Verbrennungskraftmaschinen (VKM) als auch Elektroantriebe und deren Mischformen (Hybride) eignen sich grundsätzlich. Deren Vor- und Nachteile bleiben auch für das Vehicle-on-Demand bestehen. Diese sind einerseits Speicher- und Ladvorteile von chemischer Energie, die VKM-getriebenen Fahrzeugen eine größere Reichweite ermöglichen, und andererseits die Geräusch- und Schadstoffemissionsvorteile der Elektroantriebe, die im Besonderen in dicht bewohnten Gebieten geschätzt werden. Für ein Vehicle-on-Demand ist dafür zu sorgen, dass für die beabsichtigte Fahrt genügend Energie mitgeführt wird. Daher ist von einem Versorgungskonzept auszugehen, das in den Standzeiten die Energieaufnahme integriert. Passende Anlaufstellen werden diesen Service sowohl manuell als auch automatisiert anbieten können, sei es an herkömmlichen Tankstellen oder speziellen Stromtankstellen. Induktives Laden der Batterie bietet sich dafür in besonderem Maße an. Je nach Nutzungsgrad der Fahrzeuge fällt der Nachteil des höheren Zeitbedarfs für die Energiespeicherung bei Elektrofahrzeugen unterschiedlich aus: Sind die Standzeiten immer noch höher als die Fahrzeiten, fallen die Ladezeiten weitgehend in den Nichtnutzungsbereich und sind damit ohne hohe wirtschaftliche Belastung. Anders verhält sich das bei einem Nutzungsgrad der Fahrzeuge, der auf einen Betrieb nahezu rund um die

Uhr abzielt. Für dieses Ziel fallen die Zeiten für die Energiebereitstellung erheblich ins Gewicht, da das Aufladen von Batterien zu einem deutlich größeren Nutzungsabfall führt als das Nachtanken bei VKM-angetriebenen Fahrzeugen.

(Wasserstoff-)Brennstoffzellenantriebe werden durch Vehicle-on-Demand-Konzepte eher leichter umzusetzen sein, da ein Dienstanbieter – eventuell auch im Verbund mit weiteren Anbietern – die Tank-Infrastruktur besser in den Ablauf integrieren kann als herkömmliche Automobilnutzer. So können Abstellplätze (= Bereitschaftsplätze) und Wasserstofftankstellen sowohl örtlich als auch im Ablauf aufeinander abgestimmt werden. Auch die Routen können von vornherein auf die Verbindung zwischen Wasserstofftankstellen ausgelegt werden, sofern eine Füllung für den Mobilitätsdienst nicht ausreichen sollte. Ferner lassen sich auch unvermeidbare Verflüchtungsverluste, die im Stand bei Wasserstoffdrucktanks auftreten, weitgehend minimieren, da die Standzeiten beim Vehicle-on-Demand bei wirtschaftlichem Betrieb sehr gering sein sollten. Trotz dieser Vorteile des Vehicle-on-Demand-Konzepts für die (Wasserstoff-)Brennstoffzellen-Technologie müssen sich beide Richtungen, also Vehicle-on-Demand sowie Wasserstoffantriebe unabhängig voneinander den Marktzugang schaffen. Eine (Zwangs-)Kopplung dieser Technologien bei Markteinführung verschlechtert die Chancen für beide, da dadurch nur eine Schnittmenge der Nutzungsmöglichkeiten zu einem beschränkten Marktvolumen führt, das zu klein ist, um für beide Technologien die Investitionen zu rechtfertigen.

### 13.4.3 Auswirkungen auf das Fahrwerk

Für die Kraftübertragung eines Vehicle-on-Demand werden weiterhin die Reifen zuständig bleiben, da sich weder die Vor- noch die Nachteile alternativer Konzepte (z. B. Luftkissen/Propeller, Magnetschwebeantrieb, Ketten) durch die Fahrzeugautomatisierung wesentlich verschieben. Die Anforderungen an die Fahrdynamik werden sich ebenfalls kaum ändern, und die Anforderungen an ein besonders sportliches Fahrwerk werden sich kaum im Lastenheft des Vehicle-on-Demand wiederfinden. Die Verzögerungs- und Ausweichfähigkeit (also Beschleunigung bis  $\approx 10 \text{ m/s}^2$ ) wird gegenüber heutigen Automobilen kaum geringer ausfallen, auch wenn eine deutlich komfortablere Fahrzeugführung zu erwarten ist. Allerdings besteht bei Vehicle-on-Demand die Möglichkeit, schon prädiktiv die Manöver zu planen und dabei die Möglichkeiten der gegebenen Fahrdynamik optimal auszunutzen, wodurch sich für das Fahrwerkkonzept neue Möglichkeiten ergeben können.

Neben den zwei in den nächsten Abschnitten diskutierten Aspekten der Radanordnung und der Lenkkonzepte gelten insbesondere für Vehicle-on-Demand-Fahrzeuge, deren Einsatzzweck die Personenbeförderung auf längeren Strecken ist, die gleichen Überlegungen zur Entkopplung von der Fahrdynamik wie in Abschn. 13.2.3 beschrieben. Eine Entkopplung von der Fahrdynamik *und* der Umgebung verlangt zwar enormen technischen Aufwand, würde aber eine höhere Stimmigkeit der Sinneseindrücke ermöglichen, als wenn jeweils nur ein Teil der Eindrücke entkoppelt würde. Sollten empfindliche Güter transportiert werden, würde eine entsprechende Entkopplung ebenso nützlich sein.

### 13.4.3.1 Mögliche Radkonzepte für Vehicle-on-Demand

Mit Blick auf die Stabilisierungsaufgabe für einen menschlichen Fahrer ermöglicht das Vehicle-on-Demand die Auswahl eines Radkonzepts ohne Rücksicht auf aktuell geltende Anforderungen. Dieser Freiheitsgrad motiviert die erneute Bewertung existierender Konzepte mit weniger als vier Rädern für den Einsatz als Vehicle-on-Demand.

Wie Motorräder und Trikes belegen, sind auch weniger als vier Räder tauglich für Transportaufgaben. Grundsätzlich reicht sogar *ein* Rad für die Fortbewegung, wie Einradfahr(künstl)er immer wieder eindrucksvoll beweisen. Dabei kommt der Regelung der Lage des Schwerpunkts die Schlüsselrolle zu. Diese Stabilisierung könnte ein mechatronisches System übernehmen und somit nahezu jeden befähigen, ein Einrad-Fahrzeug zu bewegen. Zwei Methoden lassen sich dazu verwenden: Momentenerzeugung am Rad und Verschiebung von beweglichen Massen.

Das erste Konzept findet beim zweirädrigen Segway<sup>®</sup> PT (Personal Transporter) Anwendung [11]. Die „Gewichtsverlagerung“ über die Füße wird sensiert und dazu eine Neigung des Passagiers eingestellt, die mit der Beschleunigung zusammenpasst, sodass der resultierende Vektor aus Schwer- und Trägheitskraft immer durch die Verbindungslinie der Radaufstandspunkte geht. In gleicher Weise wird bei zwei Rädern hintereinander manövriert. Mit einem durch eine Lenkbewegung entgegen der Kurvenrichtung bewirkten Rollmoment wird eine Schräglage erzeugt, die dann den resultierenden Vektor von Zentrifugal- und Schwerkraft durch die Verbindungslinie beider Radaufstandspunkte führt. Ein Kugelantrieb könnte diese Stabilisierung grundsätzlich für beide Richtungen übernehmen. Trotzdem bleibt in starkem Maße fraglich, ob eine solche Stabilisierung im Kontext des autonomen Fahrens sinnvoll eingesetzt werden kann. Der Nutzer ist mit der Gewichtsabstützung immer stark eingebunden. Darüber hinaus sind diese Konzepte auf niedrige Geschwindigkeiten beschränkt, da vertikale Unebenheiten wie Bordsteinstufen oder Schlaglöcher sowohl die Regeldynamik als auch die Akteurleistungsfähigkeit überfordern und somit Stürze nicht verhindert werden können. Diese Überlegung trifft auch für die einachsigen Zweiräder wie das oben genannte Segway PT zu, bei Motorrädern sind diese Vertikalhindernisse nicht in der Querbewegung zu befürchten, auch wenn Phänomene wie das Lenkerschlagen (*Kick-back*) die Sensitivität der Fahrzeugstabilisierung von Zweirädern deutlich macht.

Ähnlich dem Jonglieren mit den Armen bei Seiltänzern wird beim zweiten Konzept eine Masse so verschoben, dass der Schwerpunkt auch ohne Zutun der Insassen passend zur Längs- oder Querkraft verlagert wird. Zur Abstützung dieser Verlagerung werden kurzzeitig Drehmomente an den Rädern appliziert. Die Konzepte von Segway P.U.M.A. (Personal Urban Mobility & Accessibility) [12] wie auch die Umsetzung von General Motors als EN-V (Electric Networked-Vehicle) [13] werden im Zusammenhang mit dem autonomen Fahren verwendet. Durch die hohe Wendigkeit (Drehen auf der Stelle) und den geringen Platzbedarf bietet sich dieses Fahrzeug – selbstverständlich nicht nur auf das autonome Fahren beschränkt – für den innerstädtischen Bereich an. Als Nachteile stehen der permanente Stabilisierungsaufwand, der einen größeren Teil der mitgeführten Energie „verbraucht“, und die o. g. Empfindlichkeit gegenüber vertikalen Stufen, wobei diese prinzipbedingt geringer ausfällt, da die bewegliche Masse hier das zur Korrektur notwendige

Antriebsmoment verringern kann. Bisherigen Aussagen zufolge ist eine Höchstgeschwindigkeit von 25 Meilen pro Stunde entsprechend 40 km/h vorgesehen. Für einen Einsatz bis 120 km/h erscheint dieses Konzept kaum geeignet.

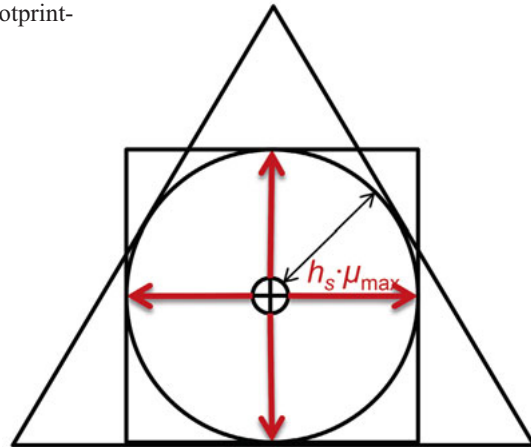
Für die klassische einspurige Zweiradanordnung mit Rädern hintereinander können ebenfalls verschiebbare Massen eingesetzt werden, wobei der Platzbedarf für die Verschiebbarkeit in Querrichtung schwieriger als in Längsrichtung bei einem einachsigen Zweirad zu befriedigen ist. Daher erscheint ein Lenkaktor, der das Balancieren übernehmen kann, für eine autonome Motorradführung aussichtsreicher. Allerdings bleibt fraglich, ob ein solches Konzept den Mobilitätswunsch für ein Vehicle-on-Demand erfüllen kann. Eine Vollverkleidung ist umständlich und erhöht die Seitenwindempfindlichkeit stark. Auszuschließen ist es jedoch nicht, denn zusätzlich zum Wetterschutz erhöht ein umschließender Rahmen die Sicherheit, wie der von 2000–2003 produzierte Motorroller BMW C1 demonstrierte [14]. In einer solchen Ausstattung ist ein einspuriges zweirädriges Vehicle-on-Demand denkbar, eventuell mit Stützrädern für sehr niedrige Geschwindigkeiten und den Stand ausgerüstet. Ob allerdings die besondere Mobilität von Einspurfahrzeugen, wie die Vorbeifahrt an aufgestauten Kolonnen, autonom fahrend umgesetzt werden kann, ist wieder eine andere Frage.

Eine gemeinsame Möglichkeit besitzen beide Ansätze: Sie können in einer Richtung kraftfreies Fahren liefern. Beim einachsigen Zweirad kann die Längskraft, beim einspurigen die Querkraft auf die Insassen vollständig kompensiert werden. Ob ein passiv die Fahrt erlebender Passagier dies als angenehm empfindet, ist allerdings offen.

Ab drei Rädern ist ein Fahrzeug ohne Regelung stabil, sofern der resultierende Kraftvektor aus Trägheits- und Schwerkraft die Fläche zwischen den Radaufstandspunkten umfassenden Verbindungslinien nicht verlässt. Abhängig von der Höhe des Schwerpunkts  $h_S$  und der zu berücksichtigenden Fahrdynamikgrenzen durch den maximalen Reibbeiwert  $\mu_{max}$  beschreibt die Fläche des resultierenden Vektors mit der Fahrbahn einen Kreis mit dem Radius  $r_{res} = h_S \cdot a_{max} / g = h_S \cdot \mu_{max}$  um den Mittelpunkt (s. Abb. 13.6). Der Mittelpunkt folgt aus der Projektion des Schwerpunkts in die x-y-Fläche der Fahrbahn. Die Fahrdynamikgrenzen ergeben sich aus den (betragsmäßigen) maximalen, auf die Erdbeschleunigung bezogenen Längs- und Querbesehleunigungen (hier als  $a_{max}/g$  für beide Richtungen gleich angenommen). Schneiden die äußeren Verbindungslinien der Radaufstandspunkte diesen Kreis, so besteht eine Kippgefahr schon im definierten Fahrdynamikbereich. Liegen sie außerhalb, so kann trotzdem unter ungünstigen Bedingungen ein Fahrzeug kippen, wie das berühmt gewordene Beispiel der ersten Mercedes-Benz A-Klasse bewies (weitere Details finden sich in [15]).

Die zur Kippsicherheit minimal nötige, durch die Radaufstandspunkte festgelegte sogenannte *Footprint*-Fläche ist bei einem Dreiradfahrzeug  $A_{FP,3} = 3\sqrt{3}r_{res}^2$  und somit um ca. 30 % größer als die quadratische Umfassung. Schwerwiegender ist die um 50 % größere minimale Breite eines dreirädrigen Fahrzeugs, das anders als in Abb. 13.6 mit zwei Eckpunkten in Längsrichtung orientiert ist (ansonsten in der gezeigten Lage 73 % vergrößerte Breite). Daher wird ein dreirädriges Fahrzeug mit rein statischer Abstützung auch als autonomes Fahrzeug kaum Anwendung finden.

**Abb. 13.6** Für Kippsicherheit benötigte Footprint-Fläche



Eine hybride Fahrwerklösung, die einen für die statische Abstützung zu kleinen Footprint aufweist, ermöglicht die Verlagerung des Schwerpunkts, sodass der in Abb. 13.6 gezeichnete Kreis sich in Bezug zum Fahrwerk verlagert, sich z. B. in einer Linkskurve nach links verschiebt. Die Verschiebung ist grundsätzlich sowohl mit einer Translationsbewegung als auch einer Rotationsbewegung darstellbar. Für das Letztgenannte steht beispielhaft das dreirädrige Motorrollerkonzept des Piaggio MP3 [16] mit seinen beiden Vorderrädern und einer Parallelogramm-Kinematik, die eine Schräglage des ganzen Rolleraufbaus möglich macht. Somit besitzt dieses Fahrzeug eine zwar eingeschränkte statische Kippstabilität, benötigt aber keine permanente Regelung für konstante Bedingungen wie z. B. für Geradeausfahrt. In Verbindung mit der o. g. Verkleidung und dem Schutzrahmen käme ein solches Konzept durchaus als Vehicle-on-Demand in Frage, wenn die Transportaufgabe darin besteht, eine, vielleicht sogar zwei Personen zu transportieren.

In analoger Weise kann ein drittes Rad auch ein einachsiges Konzept wie den schon genannten EN-V ergänzen. Damit erfolgt die statische Abstützung durch ein vor oder hinter der Hauptachse angebrachtes Rad. Allerdings erfordert die Beibehaltung des Drehens im Stand eine Lenkbarkeit des Zusatzrades. Auch Vierradkonzepte mit für Kippsicherheit zu kleinem Footprint sind denkbar. Ein Beispiel hierfür ist die Nissan-Studie Land Glider [17], ein 1,10 m breites Fahrzeug, das bis zu  $17^\circ$  Querneigung annehmen kann. Ob diese im Vergleich zum Motorroller doch noch große Vorteile gegenüber einem in üblicher Breite ausgelegten einfachen Fahrzeug ohne Neigetechnik mit sich bringt, ist zu bezweifeln. Allein die mit der Neigetechnik verbundene Möglichkeit der Kompensation der Querkraft auf die Insassen könnte ein Pluspunkt sein. Neben Neigesystemen könnten grundsätzlich auch adaptive Fahrwerke mit variabler Spurbreite oder variablem Radstand sowie variabler Schwerpunkthöhe zu einer Kippsicherheit nach Bedarf führen [18].



### 13.4.3.2 Lenkkonzepte

Heute dominiert bei Automobilen die Achsschenkellenkung an der Vorderachse, und es spricht wenig dagegen, diese auch für das Vehicle-on-Demand zu verwenden. Allerdings können alternative Lenkkonzepte durch das autonome Fahren aufgewertet werden. Dazu gehört zum einen das Kraftlenken, also über seitlich unterschiedliche Kräfte bis hin zu unterschiedlicher Krafrichtung, z. B. für Linkseindrehen negative Antriebskraft links und positive rechts. Dieses Konzept ist beim einachsigen Zweirad das Mittel der Wahl. Für drei oder vier Räder verursacht das Kraftlenken erhebliche Verzwängungen, sofern nicht ein oder mehrere zusätzliche Drehfreiheitsgrade für die Räder ein Mitlenken unterstützen.

Auf der anderen Seite steht die mehrachsige Lenkung, oft als Vierrad- oder Allradlenkung bezeichnet. Obwohl grundsätzlich im Automobilbau bekannt, sind nur sehr wenige damit ausgestattete Fahrzeuge erhältlich. Eine Nutzeneinschränkung liegt in der Kompromissauslegung heutiger Allradlenkungsfahrzeuge, die ein Fahrzeugentwickler durchführen muss. Es gibt für den Fahrer keinen Zugriff auf die Hinterradlenkung. Sie ist (elektronisch) an die Vorderradlenkung gekoppelt. In einer Kompromissabstimmung unterstützt sie bei aktuellen Fahrzeugen im unteren Geschwindigkeitsbereich ( $\leq 100$  km/h) die Fahrzeugagilität mit gegenseitigen Lenkwinkeln und bei höheren ( $\geq 100$  km/h) die Stabilität durch gleichsinnige Lenkwinkel. Darüber hinaus erfolgen Lenkkorrekturen im fahrdynamischen Grenzbereich. Eine autonome Trajektorienplanung könnte diesen Freiheitsgrad unabhängig von der Geschwindigkeit nutzen und entsprechend der geplanten Manöver einsetzen. So wäre ein Fahrstreifenwechsel auch ohne Gieren, also ohne Drehen um die Hochachse, möglich, wodurch die Rückwirkung auf die Passagiere reduziert werden kann. Beim Einparken lassen sich Manöver durchführen, die mit einer im üblichen Rahmen ausgelegten Allradlenkung nicht möglich sind, geschweige denn mit einer Standard-Vorderachslenkung.

Eine extreme Lösung wäre eine radindividuelle Allradlenkung, die zwar die Winkel aller Räder optimal stellen könnte, aber dafür noch aufwendigere Stellersysteme benötigt. Der Gewinn ist in Bezug auf die Anwendung als Vehicle-on-Demand gering. Er beschränkt sich auf eine eher für den Rennbetrieb relevante Verschiebung der Fahrdynamikgrenzen um wenige Prozent und die Reduktion des Kurvenwiderstands durch verzwängungsfreie Radführung.

### 13.4.4 Auswirkungen auf den Innenraum und die Mensch-Maschine-Schnittstelle

Wird das Vehicle-on-Demand für den Personentransport eingesetzt, ergeben sich die in Tab. 13.1 genannten Möglichkeiten der Art der Unterbringung, deren Ausrichtung und Anordnung. Grundsätzlich spricht hier nichts gegen die heute übliche Art der vor- und nebeneinander angeordneten, nach vorne gerichteten Sitze. Soweit es der Insassenschutz zulässt, kann auch davon abgewichen werden, und insbesondere sollte für die Erholung die Liegeposition offeriert werden, wobei die Ausrichtung offen bleibt, z. B. als Sitzbank in Querrichtung oder als Liegesitz in Längsrichtung.

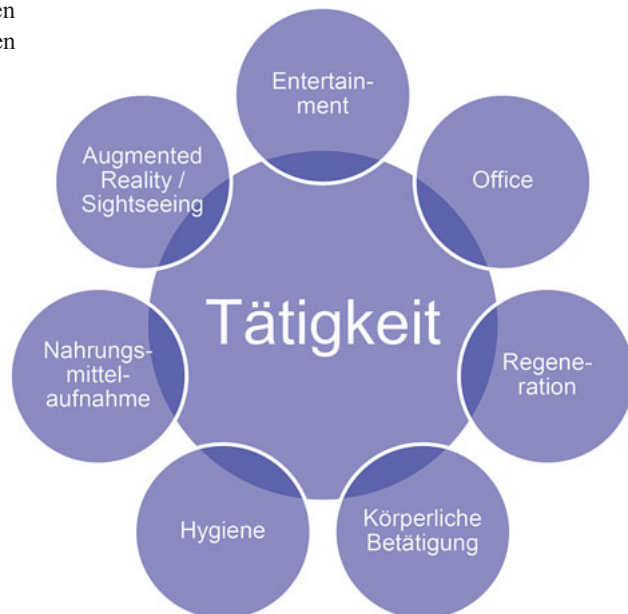
**Tab. 13.1** Allgemein mögliche Unterbringung von Insassen – Art, Ausrichtung, Anordnung

Art	stehen	sitzen	liegen	variabel
Ausrichtung	nach vorne	zur Seite	nach hinten	variabel
Anordnung	voreinander	nebeneinander	übereinander	variabel

Da keine Fahraufgabe von den Insassen zu übernehmen ist, bleibt im Wesentlichen das Interface auf die Zieleingabe, die Insasseninformation und einen Safe-Exit-Schalter, der ein Anhalten an nächster sicherer Position auslöst, beschränkt. Die ersten beiden können sogar vom Fahrzeug losgelöst sein und über ein Personal Device, ähnlich heutigen Smartphones, ermöglicht werden. Weitergehende Interaktionen sind für die Ambientsteuerung (z. B. Schließen der (elektronischen) Jalousien) und mögliche Unterhaltungsprogramme zu erwarten.

### 13.5 Use-Case-Gesamtbetrachtung

Autonomes Fahren unterscheidet sich weniger im Fahrzeugkonzept als in der Nutzung der Fahrzeit. Bei der heutigen Belegung von Autos mit statistisch 1,5 Personen [19] kann der Großteil der Personen nicht die Möglichkeiten nutzen, die ein Beifahrer heute schon besitzt, wie z. B. Lesen, Arbeiten oder Schlafen (s. Abb. 13.7). Dieses wird beim autonomen Fahren möglich. Darüber hinaus können Aktivitäten durchgeführt werden, die derzeit zu einer

**Abb. 13.7** Nutzungsmöglichkeiten für Insassen beim autonomen Fahren

unzulässigen Ablenkung des Fahrers führen würden, z. B. multimediale Unterhaltung auf einem Großbild und Surroundklang bis hin zum sogenannten 4-D-Kino.

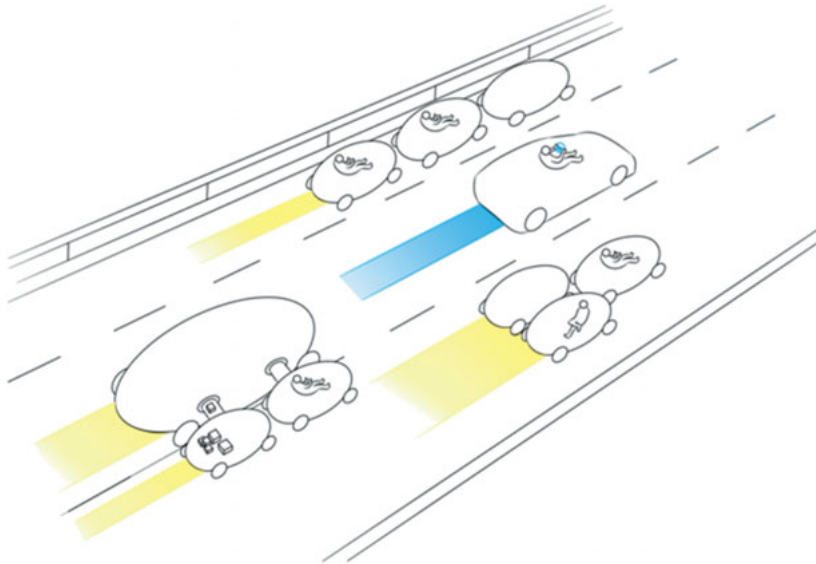
Eine weitere Änderung besteht im Nutzerkreis. War bisher immer ein Fahrer mit Fahrerlaubnis erforderlich, so entfällt zumindest beim Vehicle-on-Demand diese Einschränkung, sodass neue Nutzer das autonome Fahrzeug benutzen, die heutzutage allenfalls Mitfahrer im Fahrzeug sind. Dies können Personen sein, die aufgrund körperlicher Defizite (z. B. Sehschwäche) keine Fahrerlaubnis erhalten, oder aber Personen ohne Fahrerlaubnis wegen mentaler Defizite oder einfach aus Altersgründen ausgeschlossene Gruppen wie Kinder und Jugendliche. Entsprechend müssen das Fahrzeug- und das Betriebskonzept auch auf solche Nutzer angepasst werden. Zuvor müssen die Anforderungen definiert werden, welche Autorität die Insassen über das Geschehen im Fahrzeug und auf das Fahren haben werden.

---

## 13.6 Fahrzeugübergreifende Änderungen

Standen bisher die Einzelfahrzeuge im Fokus der Betrachtung, wird die Systemgrenze in diesem Abschnitt auf die Interaktion mit der Umwelt und anderen Verkehrsteilnehmern erweitert. Die Interkonnektivität der Fahrzeuge wird schon früher als Technik für alle (Neu-)Fahrzeuge etabliert sein, sodass sich damit nichts grundsätzlich Neues durch die Einführung des autonomen Fahrens ergibt. Allerdings steigt mit der Automatisierung der Fahrzeuge deren Leistungsfähigkeit, die neue Nutzungsweisen ermöglicht. Durch zu erwartende höhere Präzision autonomer Fahrzeuge sind elektronisch gesteuerte Manöver denkbar, die in dieser Form im heutigen Verkehr kaum denkbar sind. Zu diesen Möglichkeiten zählt das Konvoi-Fahren in sehr geringem Abstand oder das Fahren in besonders engen Fahrstreifen. Die Auswirkung auf den Verkehrsfluss wird anhand von Abb. 13.8 deutlich. Die Anzahl von Verkehrselementen, die die abgebildete Verkehrsfläche durchqueren, nimmt pro Zeiteinheit zu. Wird das mit entsprechenden Bevorrechtigungen gekoppelt, kann dies dem autonomen Fahren einen Schub geben. Abhängig von den mit solchen Bevorrechtigungen verbundenen Vorgaben kann sich auch das Fahrzeugkonzept ändern und mit diesen Vorgaben sogar das Aussehen. Wie weit eine solche Reglementierung in das Fahrzeugkonzept eingreifen kann, belegt die in der EU übliche Begrenzung der Gesamtfahrzeuglänge von Lkw. Dadurch sind alle Zugfahrzeuge in Europa mit einer steilen, platzsparenden Fahrzeugfront ausgestattet, während in Nordamerika ohne diese Art der Begrenzung die Motorhaube aerodynamisch günstiger nach vorn gestreckt ist.

Denkbar, wenn auch aus heutiger Sicht noch sehr ausgefallen, ist der Stoffaustausch während der Fahrt, wie es heute in der Landwirtschaft (z. B. Entladen des Getreideguts beim Mähen) oder in der Luftfahrt beim Betanken in der Luft bekannt ist. Für Gütertransport oder Personentransport könnte so Zeit und Raum gespart werden. Entsprechend müssen folglich Übergangszonen im Fahrzeugkonzept vorgesehen sein. In Abb. 13.8 wird dieses Prinzip dargestellt. Ein Lkw-ähnliches Langstrecken-Fahrzeug übergibt Güter während der Fahrt an das kleinere „Verteilerfahrzeug“. Die Fahrt wird mittels Automation präzise synchronisiert, und eine Art Brücke ermöglicht den Gütertausch. Damit lassen



**Abb. 13.8** Reduzierte Abstände zwischen den Fahrzeugen – ermöglicht durch die autonome Fahrt mit hoher Präzision

sich völlig neue Logistik- und Mobilitätskonzepte entwickeln, wobei aber ohne Diskussion des Gesamtsystems die Konzeption der Fahrzeuge wenig sinnvoll erscheint, weshalb hier keine entsprechende Vertiefung vorgenommen wird.

### 13.7 Folgekonzepte

Während die durchgängig behandelten Use-Cases das Potenzial besitzen, der für autonomes Fahren notwendigen Technologie zum Durchbruch zu verhelfen, kann eine Vielzahl von Anwendungen die selbst nicht ausreichend wären, eine Technologie zur notwendigen Reife zu führen, davon profitieren. Somit kämen straßentaugliche Serviceroboter infrage, die z. B. die Straßen, Rad- und Gehwege reinigen und sich selbstständig über öffentliche Wege von Einsatzort zu Einsatzort bewegen. Andere bisher auf Betriebshöfe eingeschränkte Transport- und Arbeitsmaschinen könnten diese verlassen, oder anders gesagt: Der Betriebshof erweitert sich auf öffentliches Gelände.

Damit verschwinden die Grenzen, die bisher noch um autonome Systeme gezogen werden, sowohl von der Skalierung her (vom Haushaltsroboter über Gehhilfe und Reinigungsroboter zum Postaustragemobil und Krankentransport) als auch bezüglich der privaten, öffentlichen und betrieblichen Bereiche ihres Einsatzes. Diese Konzepte hätten auf die Arbeitswelt einen großen Einfluss und könnten durch eine neue Rationalisierungswelle die Zahl der im Mobilitätssektor tätigen Menschen senken. Dieser Use-Case, dem Vehicle-on-Demand-Konzept folgend, besitzt das Potenzial, vor allem die Zahl der Berufsfahrer-

arbeitsplätze erheblich zu senken. Neben der Arbeitswelt könnten solche Fahrzeuge besonders den Zugang zu Waren revolutionieren, da der Weg vom Wunsch nach Waren bis zur physikalischen Auslieferung automatisierbar wird (s. Kap. 18). Modellversuche mit Multi-Copter-„Drohnen“ zeichnen diesen Weg für leichte Güter schon vor. Durch den nicht einholbaren Energieeffizienzvorteil von Radfahrzeugen wird die Nachfrage nach autonomen Radfahrzeugen für die Auslieferung schwererer Güter sicherlich kommen.

---

## 13.8 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend lassen sich nach der Betrachtung der vier Use-Cases folgende drei Schwerpunkte für Konzeptänderungen identifizieren:

Die Fahrzeit beim autonomen Fahren bindet niemanden mehr an die Fahraufgabe. Dadurch entstehen Freiräume für die Nutzung dieser Zeit. Die unterschiedlichen Nutzungsziele werden einen starken Einfluss auf den Innenraum und die Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle ausüben.

Die Entkopplung von der Fahraufgabe ermöglicht eine Veränderung der Ankopplung an die Umgebung. Dies gilt sowohl für den haptischen Kanal zur Entkopplung von fahrbahn- und fahrdynamikinduzierten Kräfteinwirkungen auf die Insassen als auch für die visuelle Entkopplung. Allerdings besteht hier der Vorbehalt wegen möglicher visuell-vestibularer Konflikte, wie sie heute in Fahrsimulatoren zu beobachten sind. Diese werden erst dann gelöst, wenn eine vollständige Entkopplung in beiden Welten erreicht wird, d. h. gar kein visueller Eindruck von außen und keine Kraft auf die Insassen einwirken. Dies wäre nicht nur sehr aufwendig für das Fahrwerk zu realisieren, sondern möglicherweise für die Insassen beängstigend.

Da autonomes Fahren immer über eine By-Wire-Stelleransteuerung erfolgt, kann von einer sehr hohen Präzision der Bewegungssteuerung ausgegangen werden. Zum einen ermöglicht dies neue Lenkkonzepte, möglicherweise auch gekoppelt mit Vorrichtungen zur Kippsicherung bei Fahrzeugen mit einem zur alleinigen Kippsicherheit unzureichenden Footprint, insbesondere wenn eine Steuerung durch den Menschen nicht mehr vorgesehen ist. Andererseits ermöglicht diese Präzision die Kopplung an andere autonome, ebenso präzise Fahrzeuge, um die Infrastruktur besser auszunutzen oder heute noch ausgefallenen anmutende Konzepte wie Car2Car-Stoffaustausch zu ermöglichen.

Mit Blick auf die Zukunft stellt sich die Frage, ob das autonome Fahren die Fahrzeugkonzepte revolutionieren wird.

Die Automation treibt eine Revolution der Fahrzeugkonzepte nicht an. Zwar werden manche Konzepte durch die Automatisierung weniger „benachteiligt“, die klassischen Fahrzeugkonzepte wie vierrädrige Pkw werden jedoch voraussichtlich auch in der automatisierten Straßenverkehrswelt dominieren. Für spezielle Nischeneinsatzbereiche ergeben sich aber neue Möglichkeiten, nur wird die Attraktivität dieser Nischen eher durch spezifische Regulierungen und Zugangsbeschränkungen getrieben als durch die Überlegenheit des Konzepts für den allgemeinen motorisierten Individualverkehr.

Wie schon heute wird auch bei autonomen Fahrzeugen die Nutzung des Konzeptes bestimmen, wobei die Nutzung der gewonnenen Fahrzeit gerade Innenraumkonzepte neu beleben wird.

Möglicherweise wird die Technologie des autonomen Fahrens den Markt noch weiter als heute differenzieren:

Auf der einen Seite werden teure komfortorientierte Hightech-Fahrzeuge, die Sänften gleichen, als rollendes Wohn-, Arbeits- oder Schlafzimmer dienen.

Auf der anderen Seite werden kostengünstige Zweckfahrzeuge eingesetzt werden, die die für den Transportdienst notwendige Ausrüstung mitbringen, aber darüber hinaus eher kleinen Stadtbussen gleichen und weder emotionale Anziehungskraft besitzen noch hohe Komfortansprüche befriedigen.

Die für autonome Fahrzeuge in den o. g. Use-Cases entwickelte Technologie wird noch viele Spin-off-Anwendungen nach sich ziehen, die die Dienstleistungswelt erheblich ändern können.

---

## Literatur

1. Gasser, T. M.; Arzt, C.; Ayoubi, M.; Bartels, A.; Bürkle, L.; Eier, J.; Flemisch, F.; Häcker, D.; Hesse, T.; Huber, W.; Lotz, C.; Maurer, M.; Ruth-Schumacher, S.; Schwarz, J.; Vogt, W.: Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung. Gemeinsamer Schlussbericht der BAST-Projektgruppe „Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung“ Dokumententeil 1. Wirtschaftsverband NW, Bergisch Gladbach, Heft F 83, (2012)
2. Franz, B.: Entwicklung und Evaluation eines Interaktionskonzepts zur manöverbasierten Führung von Fahrzeugen. Dissertation, Institut für Arbeitswissenschaft, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, (2014)
3. Winner, H., Heuss, O.: X-by-Wire-Betätigungselemente – Überblick und Ausblick. In: Winner, H., Landau, K. (Hrsg.): Darmstädter Kolloquium Mensch & Fahrzeug – Cockpits für Straßenfahrzeuge der Zukunft, Technische Universität Darmstadt, Ergonomia-Verlag, Stuttgart, (2005)
4. Futschik, H. D., Achleitner, A., Döllner, G., Burgers, C., Friedrich, J. K.-H., Mohrdieck, C. H., Schulze, H., Wöhr, M., Antony, P., Urstöger, M., Noreikat, K. E., Wagner, M., Berger, E., Gruber, M., Kiesgen, G.: Formen und neue Konzepte. In Braess, H.-H., Seiffert U. (Hrsg.): Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, 7. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, (2013), S. 119–219
5. Kammel, S.: Autonomes Fahren. In: Winner, H., Hakuli, S., Wolf, G. (eds.) Handbuch Fahrerassistenzsysteme, pp. 651–657. Vieweg+Teubner Verlag, (2012)
6. Durth, W.: Ein Beitrag zur Erweiterung des Modells für Fahrer. Fahrzeug und Straße in der Straßenplanung In: Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Bonn-Bad Godesberg, H **163**, (1974)
7. McConnell, W.A.: Human Sensitivity to Motion as a Design Criterion for Highway Curves. Highway Research Board Bulletin(149), (1957)
8. Fischer, M.: Motion-Cueing-Algorithmen für eine Realitätsnahe Bewegungssimulation. Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt in der Helmholtz-Gemeinschaft, DLR, (2009)
9. Betz, A.: Feasibility Analysis and Design of Wheeled Mobile Driving Simulators for Urban Traffic Simulation, Dissertation, Fachgebiet Fahrzeugtechnik, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, (2014)
10. Schütz, T.: Hucho – Aerodynamik des Automobils: Strömungsmechanik, Wärmetechnik, Fahrdynamik, Komfort, 6. Auflage, ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2013

11. YSegway® Personal Transporter: <http://www.segway.de/segway-pt/das-original>, Abruf am: 26.08.2014
12. SegwayY® Advanced Development, Project P.U.M.A: <http://www.segway.com/puma>, Abruf am: 26.08.2014
13. GM EN-V Concept: A Vision for Future Urban Mobility: <http://media.gm.com/autoshow/ Shanghai/2010/public/cn/ en/env/news.detail.html/content/Pages/news/cn/en/2010/March/env01.html>, Abruf am: 26.08.2014
14. BMW C1: [http://de.wikipedia.org/wiki/BMW\\_C1](http://de.wikipedia.org/wiki/BMW_C1), Abruf am: 26.08.2014
15. Baumann, F.: Untersuchungen zur dynamischen Rollstabilität von Personenkraftwagen, Fortschritt-Bericht VDI Reihe 12 Nr. 552, VDI-Verlag, Düsseldorf, (2003)
16. Piaggio MP3: <http://www.de.piaggio.com/piaggio/DE/de/news/MP3.html#main>, Abruf am: 26.08.2014
17. Schröder, C.: Tokyo Motor Show: Nissan präsentiert Stadtauto mit Neigetechnik, Verfügbar unter: <http://www.springerprofessional.de/tokyo-motor-show-nissan-praesentiert-stadtauto-mit-neigetechnik-10712/3946650.html>, Abruf am: 26.08.2014
18. Schweitzerhof, H., Betz, A., Winner, H.: Analysis of a situational adaptive chassis with respect to maneuverability and footprint. In: Proceedings of the ASME 2014 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference. IDETC/CIE 2014, Buffalo, New York, USA, August 17–20 (2014)
19. Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH (infas), Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR): Mobilität in Deutschland 2008, Ergebnisbericht: Struktur, Aufkommen, Emissionen, Trends, Bonn und Berlin, (2010)

---

# Implementierung eines selbstfahrenden und individuell abrufbaren Personentransportsystems

# 14

Sven A. Beiker

## Inhaltsverzeichnis

<b>14.1 Einleitung</b> .....	288
<b>14.2 Begriffsbestimmung und Abgrenzung</b> .....	288
<b>14.3 Das selbstfahrende und individuell abrufbare Personentransportsystem</b> .....	289
14.3.1 Technische Ausführung .....	290
14.3.2 Operativer Betrieb .....	292
14.3.3 Geschäftsmodell .....	294
<b>14.4 Erfahrungen bei der Umsetzung des Transportsystems</b> .....	295
14.4.1 Evaluations-, Versuchs- und Öffentlichkeitsbetrieb .....	295
14.4.2 Auswahl des Fahrzeugkonzepts .....	297
14.4.3 Risikobewertung und Rechtseinordnung .....	297
14.4.4 Vertragsgestaltung .....	298
14.4.5 Auswahl des Betriebsgebiets und der Betriebsszenarien .....	299
14.4.6 Einrichtung des Transportsystems und Zertifizierung des Personals .....	301
14.4.7 Systemstart und Betriebsüberwachung .....	302
14.4.8 Information für Nutzer und Passanten .....	303
14.4.9 Öffentliche Reaktionen .....	304
<b>14.5 Zusammenfassung und Ausblick</b> .....	305
<b>Literatur</b> .....	307

---

S. A. Beiker (✉)  
formerly Stanford University, Center for Automotive Research at Stanford, USA  
sven@svenbeiker.com



## 14.1 Einleitung

Derzeit wird in der Fachwelt und in der Öffentlichkeit viel über automatisierte (oft auch „autonom“ genannte) Fahrzeuge diskutiert und geforscht bzw. werden deren erste Produktumsetzungen entwickelt. Dabei steht häufig der individuell genutzte Pkw im Mittelpunkt der Betrachtung, d. h., der Blick richtet sich auf die zunehmende Automatisierung der Fahrzeuge auf Stadt- und Fernstraßen. Während die Vision, dass Pkw auf öffentlichen Straßen ohne menschlichen Eingriff selbsttätig fahren, noch in ferner Zukunft zu liegen scheint, gibt es bereits Beispiele, wo schon heute oder zumindest sehr bald selbstfahrende Fahrzeuge für den öffentlichen Personentransport eingesetzt werden. Nachdem schienengebundene Systeme über die letzten Jahrzehnte bereits erfolgreich ohne fahrzeugseitiges Personal betrieben wurden, wird nun auf der Straße die Schiene als „Leitmedium“ durch Satellitennavigation sowie Hinderniserkennung ersetzt, um dann eine automatisierte Fahrt zum Wunschziel des Nutzers zu ermöglichen.

Von solchen selbstfahrenden Transportsystemen kann bereits heute viel an Erfahrung für die zukünftige Einführung hochgradig automatisierter Pkw abgeleitet werden, obwohl diese Systeme häufig nur in einem begrenzten Gebiet wie dem Innenstadtbereich betrieben werden. So sind beispielsweise die betriebsbedingten, nutzerspezifischen, versicherungstechnischen oder haftungsrechtlichen Belange für langsam fahrende und gebietsbegrenzte Fahrzeuge im Kern oftmals ähnlich denen für Fahrzeuge auf Autobahnen. Damit steht zu hoffen, dass die hier beschriebenen selbstfahrenden und individuell abrufbaren Personentransportsysteme trotz unterschiedlicher Zielrichtungen im Vergleich zu hochgradig automatisierten Reiselimousinen Synergien aufzeigen, die für die Einführung letzterer in den öffentlichen Straßenverkehr wegweisend sein können. In diesem Beitrag wird von der Implementierung eines solchen Transportsystems an der Stanford Universität in Kalifornien berichtet. Anliegen dieses Berichts ist es, die hier gemachten Erfahrungen der zukünftigen Einführung anderer automatisierter Fahrzeuge zugutekommen zu lassen.

---

## 14.2 Begriffsbestimmung und Abgrenzung

In diesem Beitrag wird hauptsächlich von „selbstfahrenden und individuell abrufbaren Personentransportsystemen“ bzw. derartigen Fahrzeugen gesprochen. Der Begriff „selbstfahrend“ ist dabei in den Bereich der Fahrzeugautomatisierung einzuordnen: In Straßenfahrzeugen werden Computersysteme so eingesetzt, dass dem Menschen die Fahraufgabe abgenommen wird. In dem hier betrachteten Fall wird die Fahraufgabe entsprechend der „Navigation“, „Bahnführung“ und „Stabilisierung“ vollständig durch Computersysteme ausgeführt, und ein Fahrer ist damit nicht mehr erforderlich. Unter Umständen ist sogar keine einzige Person im Fahrzeug anwesend, wenn das Fahrzeug beispielsweise für logistische Zwecke eine Leerfahrt unternimmt. Diese Automatisierungsebene wird auch als „Vollautomatisierung“ entsprechend der Definition SAE J3016 [1] bezeichnet.

Der Begriff „individuell abrufbar“ (englischsprachig *on-demand*) beschreibt, dass das Transportsystem vom Nutzer für die individuelle Verwendung abgerufen werden kann (s. Kap. 2). Das kann beispielsweise über eine Smartphone-App erfolgen, d. h., der Nutzer kann ein Fahrzeug zum derzeitigen Standort anfordern, genauso wie ein Taxi, nur mit dem Unterschied, dass die Fahrzeuge des hier betrachteten Transportsystems keine Fahrer benötigen. Damit ergibt sich auch, dass der Begriff „Transportsystem“ als ein Gesamtkonzept aus verschiedenen Fahrzeugen sowie einer zentralen Infrastruktur, die die Fahrzeuge übergeordnet für den Nutzereinsatz koordiniert, verstanden wird.

Die Betrachtungen, die im vorliegenden Beitrag für ein solches Personentransportsystem angestellt werden, beziehen sich auf ein Ballungsgebiet, also einen bebauten Raum mit einer erhöhten Bevölkerungsdichte. Das bedeutet, dass eine urbane Bebauung mit Straßen, Parkplätzen, Radwegen, Fußwegen, Fußgängerzonen sowie Gebäuden angenommen wird, auf und zwischen denen das Transportsystem für die Personenbeförderung eingesetzt wird. Die Größe des Ballungsgebiets ist dabei weniger entscheidend als deren städtebaulicher Charakter, d. h., es ist unerheblich, ob es sich um eine sogenannte „Mega-City“ handelt oder lediglich um den Innenstadtbereich einer Mittel- oder gar Kleinstadt. Die hier betrachteten Personentransportsysteme werden für den generellen Einsatz dort betrachtet, wo der öffentliche Personentransport oder das privatgenutzte Automobil keine optimale Lösung für die Mobilitätsbedürfnisse von Nutzern darstellt.

---

### **14.3 Das selbstfahrende und individuell abrufbare Personentransportsystem**

In diesem Beitrag wird ein konkretes Beispiel eines selbstfahrenden und individuell abrufbaren Personentransportsystems beschrieben, und zwar das Fahrzeug „Navia“ der französischen Firma Induct [2]. Ein solches Fahrzeug stand von Juli 2013 bis Februar 2014 an der Stanford Universität für Evaluationszwecke zur Verfügung, sodass der Einsatz dieses Fahrzeugs seit Anfang 2013 operativ gestaltet und dokumentiert werden konnte. Auf diesen empirischen Erfahrungen beruhen die nachfolgenden Ausführungen. Grundsätzlich ist festzuhalten, dass Fahrzeuge wie der Navia ein gutes Beispiel für einen allgemeinen Trend solcher Systeme sind [3, 4, 5, 6]. In diesem Zusammenhang sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die spezielle Darstellung des Navia in keinster Weise eine Präferenz oder Bewertung des Systems im Vergleich zu anderen darstellt, auch hat die Firma Induct keinerlei Einfluss auf die Beschreibung der hier diskutierten Sachverhalte ausgeübt. Das bedeutet, dass die folgenden Beschreibungen zwar auf Grundlage der Erfahrungen mit dem Induct Navia an der Stanford Universität entstanden sind, im wissenschaftlichen und verkehrsplanerischen Sinne aber eine generelle Anwendbarkeit für selbstfahrende und individuell abrufbare Transportsysteme im Allgemeinen haben und bei der Umsetzung anderer Systeme grundsätzlich genutzt werden können.

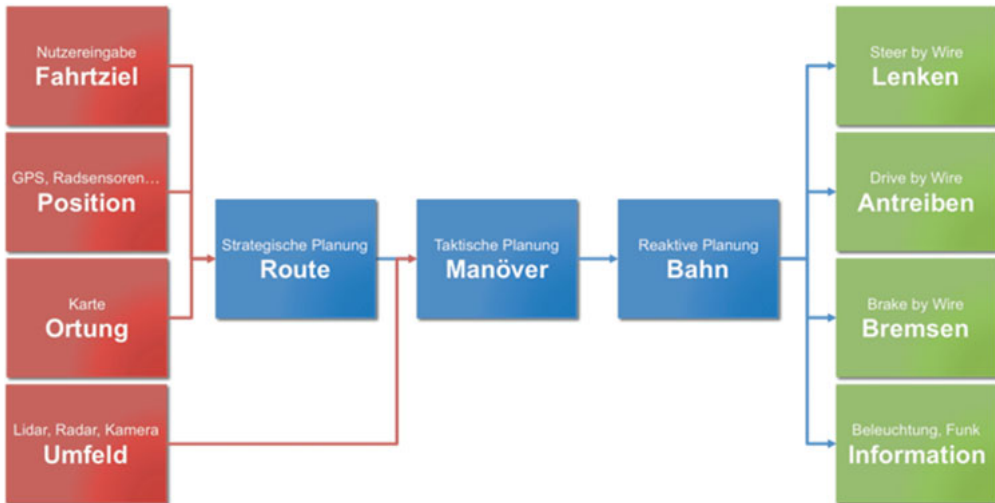
### 14.3.1 Technische Ausführung

Das für die Ausführungen in diesem Beitrag betrachtete selbstfahrende und individuell abrufbare Personentransportsystem nutzt Fahrzeuge, die mit Satellitennavigation, Laser, Kameras, Ultraschall, Lenkwinkel- und Raddrehwinkelsensoren ausgestattet sind. Mit diesen Sensoren und Systemen können Position und Umfeld des Fahrzeugs bestimmt und überwacht werden. Während die Satellitennavigation bereits eine recht genaue Positionsbestimmung ermöglicht (im Falle der Verwendung von zusätzlichen Korrekturmethode bis in den Zentimeterbereich hinein), nutzen die hier betrachteten Systeme ein Verfahren, das als Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) bezeichnet wird.

Für dieses Verfahren wird das Fahrzeug zunächst durch Betriebspersonal in dem geplanten Betriebsgebiet manuell gesteuert, während die Koordinaten der Satellitennavigation und die Daten der Laser-, Kamera-, und gegebenenfalls Ultraschallsysteme aufgezeichnet werden. Aus diesen Daten wird eine digitale Karte des Betriebsgebiets erstellt, die allerdings – anders als herkömmliche Karten – eine dreidimensionale Repräsentation des Gebiets ergibt. Diese Repräsentation beschreibt die stationäre Situation des Gebiets, d. h., alle Veränderungen, die im späteren Betrieb der Fahrzeuge gegenüber diesen gespeicherten Daten wahrgenommen werden, werden als bewegliche oder zumindest neu hinzugekommene Hindernisse eingeordnet. Diese Veränderungen sind damit besonders zu beachten und erfordern möglicherweise eine Abweichung von der vorprogrammierten Bahn.

Die SLAM-Technologie stellt damit eine „virtuelle Schiene“ dar, d. h., was für automatisierte Schienensysteme die physikalische Spurführung, ist für die hier betrachteten Systeme die Satellitennavigation als Referenzsystem in Verbindung mit der Umfelderkennung. Abweichungen zwischen der gespeicherten Repräsentation und der kontinuierlichen Umfelderkennung werden als Hindernisse eingeordnet, die gegebenenfalls eine Änderung der Routen- bzw. Bahnführung erfordern. Dabei dienen die Lasersensoren vorrangig zum Erfassen von Objekten (beispielsweise Personen, Fahrzeuge, Bebauung, Hindernisse) im Mittel- und Fernbereich mit einer Entfernung vom Fahrzeug von mehr als ca. einem Meter bis hin zu 200 Metern. Die Ultraschallsensoren werden für Objekterkennung im Nahbereich eingesetzt, also weniger als zwei Meter vom Fahrzeug entfernt. Die Kamerasysteme bieten darüber hinaus zusätzliche Informationen über die Kontur und damit Art des erfassten Objekts (z. B. Person oder Pflanze), sodass ein möglichst vollständiges Bild nach Art, Entfernung, Richtung und gegebenenfalls Geschwindigkeit der umgebenden Objekte entsteht.

Änderungen des Referenzsystems, also Hindernisse in der geplanten Route, werden in der zentralen Steuereinheit des Fahrzeugs berücksichtigt, sodass die tatsächliche Route fortlaufend unter Beachtung verschiedener Bewertungskriterien bestimmt werden kann. Somit werden je nach eingegebenem Fahrziel und augenblicklicher Verkehrs- und Umfeldsituation eine optimale Route und Bahn berechnet und ausgeführt. Selbst wenn augenblicklich keine Route befahren werden kann, beispielsweise weil die fahrzeugseitige Sensorik bei Annäherung an ein Hindernis erkennt, dass dieses nicht umfahren werden kann und auch keine Alternativroute verfügbar ist, würde das Fahrzeug dann die Fahrt bis zur Beseitigung des Hindernisses unterbrechen.



**Abb. 14.1** Blockschaltbild eines selbstfahrenden Fahrzeugs (schematisch, vereinfacht)

Die Fahrbefehle werden an die elektrifizierten Lenkungs-, Brems- und Antriebssysteme zur Umsetzung übermittelt. Das bedeutet, das Fahrzeug verfügt über elektronische Schnittstellen für diese Komponenten, sodass die zentrale Steuereinheit des Fahrzeugs Lenk-, Brems- und Antriebsbefehle übermitteln kann und das Fahrzeug somit die Fahrt durch das Zusammenspiel von Umfelderkennung, Informationsverarbeitung und Fahrtwunsch selbstständig ausführt (s. Abb. 14.1). Dabei wird jede Achse einzeln über je einen büstenlosen 48V/8kW-Elektromotor angetrieben. Das Fahrzeug verfügt über unabhängige Lenkungen an Vorder- und Hinterachse. Die technische Höchstgeschwindigkeit beträgt 40 km/h, ist für erste Anwendungen auf 20 km/h limitiert und kann bei Bedarf weiter per Parametrierung begrenzt werden, der Wendekreisdurchmesser beträgt 3,5 Meter.

Der Benutzer des Fahrzeugs hat mehrere Eingriffsmöglichkeiten in den Fahrzeugbetrieb. Zum einen kann das Fahrzeug über einen Eingabebildschirm an einer festen Haltestelle abgerufen werden, im allgemeinen Fall wird das aber über eine Smartphone-App erfolgen. Wenn das Fahrzeug dann selbsttätig zu der angeforderten Einsteigeposition kommt, werden nach Fahrzeugstillstand die Parkbremsen angezogen und die Tür (in diesem Falle eine offene Stahlrohrkonstruktion) geöffnet, sodass Passagiere sicher in das Fahrzeug einsteigen können. Dann gibt der Benutzer über einen im Fahrzeug verbauten Eingabebildschirm das gewünschte Fahrtziel ein, worauf sich die Tür wieder schließt und die Parkbremse gelöst wird, sodass sich das Fahrzeug entsprechend der nun geplanten Route in Bewegung setzen kann. Dabei haben Passagiere die Möglichkeit, das Fahrzeug jederzeit durch einen Notfallschalter sofort zu stoppen. In solch einem Fall können Passagiere auch über eine Kommunikationsanlage mit dem Betriebspersonal in Verbindung treten, um Hilfe anzufordern oder sonstige Belange zu klären. Da die Verbindung über Funkkommunikation erfolgt, kann das Betriebspersonal vollkommen unabhängig vom eigentlichen Betriebsgebiet der Fahrzeuge stationiert sein.



**Abb. 14.2** Offene Bauweise des Induct Navia [2] (Abbildung mit freundlicher Genehmigung der Fa. Induct)

Wie Abb. 14.2 zeigt, zeichnet sich das hier betrachtete Fahrzeug durch eine sehr offene Bauweise aus. Oberhalb Hüfthöhe der Passagiere gibt es keine geschlossene Beplankung, sondern nur vier Stützen für das Baldachindach. Sitze sind in dem Fahrzeug ebenfalls nicht vorhanden, sondern nur Möglichkeiten für Passagiere, sich an gepolsterten Stützen anzulehnen. Das Fahrzeug bietet Platz für bis zu acht Personen (maximale Zuladung 800 Kilogramm); die Hauptabmessungen betragen  $3,5 \times 2,0 \times 2,5$  Meter (Länge  $\times$  Breite  $\times$  Höhe).

Die Stromversorgung der Fahrzeuge hat eine geschätzte Betriebsdauer von ca. acht Stunden über den chemischen Energiespeicher (Batterie) oder 20 Minuten über den kapazitiven Energiespeicher (*Supercapacitor*). Das Laden kann wahlweise außerhalb der Betriebszeiten über ein Kabel erfolgen oder während kurzer Betriebspausen über eine drahtlose Ladestation. Gerade die drahtlose Ladevariante ist für das fahrerlose Betriebsmodell von Vorteil, da die Fahrzeuge bei Bedarf selbstständig zur Ladestation fahren können und kein Personal erforderlich ist, um beispielsweise ein Ladekabel anzuschließen. Für den Betrieb an der Stanford Universität wird allerdings vorerst die Ladevariante per Kabel außerhalb der Betriebszeiten vorgezogen, da sich das für den zunächst geplanten Versuchsbetrieb mit dem Betriebspersonal vor Ort vergleichsweise einfach darstellen lässt.

### 14.3.2 Operativer Betrieb

Für den Betrieb eines selbstfahrenden und individuell abrufbaren Personentransportsystems sind trotz des weitestgehend unabhängig operierenden Charakters einige spezielle Bedingungen zu betrachten. So ist beispielsweise Betriebspersonal erforderlich, das, wenn auch nicht notwendigerweise jeden einzelnen Lenk-, Brems- oder Antriebsbefehl, so aber

doch den grundsätzlichen Betrieb im Rahmen des festgelegten Gebiets (räumliche Begrenzungen) bzw. bestimmter Parameter (z. B. Geschwindigkeit oder Position) sicherstellt. Dafür werden – wie beispielsweise auch bei fahrerlosen Bahnen oder Logistiksystemen – Betriebszentren eingerichtet, in denen vergleichsweise wenig Betriebspersonal eine große Anzahl von Fahrzeugen überwacht. Das Betriebszentrum ist mit den einzelnen Fahrzeugen über Funk verbunden und kann die Betriebsdaten des Fahrzeuges überwachen, das Fahrzeug im Notfall stoppen oder auch mit den Passagieren kommunizieren.

In jedem Fall ist aber für den Betrieb der hier betrachteten Fahrzeuge ein Kommunikationssystem einzurichten, das die Betriebsüberwachung ermöglicht. Das kann durch verschiedene Kommunikationsstandards erfolgen, so z. B. über das Mobiltelefonnetz oder aber auch durch WLAN- Netzwerke. In beiden Fällen muss sichergestellt sein, dass die Übertragungszeit und Verfügbarkeit der Datenübertragung den Anforderungen jederzeit gerecht wird.

Damit ist anzumerken, dass aufgrund der kontinuierlichen Funküberwachung und Übernahmefähigkeit durch das Betriebspersonal keine Vollautomatisierung im strengen Sinne der Definition nach SAE J3016 [1] gegeben ist, da diese für die Vollautomatisierung keinerlei menschliche Überwachung und Übernahme im Ausnahmefall erfordert. Dennoch muss bei Transportsystemen wie dem Navia beachtet werden, dass kein Betriebspersonal unmittelbar vor Ort ist, sodass die Fahrzeuge in der Lage sein müssen, auch einen Notfall selbsttätig zu bewältigen. Das wiederum entspricht einer Vollautomatisierung nach SAE J3016, zeigt aber auch die Grenzen dieser Definition auf.

Des Weiteren sind Streckennetz sowie Betriebszeiten für den Betrieb festzulegen. Das bedeutet, es ist zu definieren, welche Strecken (detaillierte Begrenzung) in welchem Gebiet (übergeordnete Begrenzung) befahren werden können. Die Begrenzung auf ein bestimmtes Gebiet erfolgt aufgrund der Festlegung, welcher Bereich aus Überlegungen hinsichtlich der Nutzerbedürfnisse, Überwachungsanforderungen, Fahrleistungen, Gesetzgebung, Wirtschaftlichkeit oder aus sonstigen Beweggründen heraus mit dem Transportsystem bedient werden soll. Für die hier betrachteten selbstfahrenden und individuell abrufbaren Personentransportsysteme kann die Beschränkung auf eine Fußgängerzone, einen Stadtteil oder auch eine ganze Stadt erfolgen, wobei in allen Fällen im Detail zu beachten ist, auf welchen Wegen, Straßen oder Fahrspuren die Fahrzeuge bewegt werden dürfen.

Für den Betrieb der hier betrachteten Transportsysteme ist für den flexiblen Verwendungszweck zu berücksichtigen, dass auf manchen Wegen, wie beispielsweise in Fußgängerzonen, generell keine motorisierten Fahrzeuge bewegt werden dürfen und in diesem Fall eine entsprechende Genehmigung für den Betrieb dieser speziellen, selbstfahrenden motorisierten Fahrzeuge eingeholt werden müsste. In anderen Fällen, wenn die Fahrzeuge im öffentlichen Straßenverkehr bewegt werden sollen, muss vermutlich in den meisten Gesetzgebungsbereichen eine Erlaubnis für den Betrieb selbstfahrender Fahrzeuge eingeholt werden. In manchen Gesetzgebungsbereichen, wie z. B. in einigen Bundesstaaten der USA, ist eine entsprechende Gesetzgebung bereits in der Umsetzung.

Bezüglich der Betriebszeiten ist zu überlegen, ob die Mobilitätsdienstleistung rund um die Uhr angeboten werden soll, was aufgrund des weitestgehend personalunabhängigen

Betriebs möglich und im Sinne eines kundenfreundlichen Angebots vorteilhaft ist. Allerdings mögen auch hier wieder verschiedene Einschränkungen, vorrangig vermutlich betriebswirtschaftliche Überlegungen, einen Betrieb nur zu bestimmten Zeiten sinnvoll erscheinen lassen. So kann es beispielsweise sein, dass die Fahrzeuge nachts in einem Betriebshof geparkt sein sollten, um Vandalismus vorzubeugen. Eine andere Möglichkeit wäre, dass die Mobilitätsdienstleistung nur dann angeboten werden soll, wenn Busse oder andere öffentliche Verkehrsmittel nicht verkehren, sodass die Fahrzeuge dann tagsüber in einem Betriebshof geparkt wären.

Für alle diese Fälle sind sowohl die räumliche als auch die zeitliche Begrenzung des Fahrzeugbetriebs vergleichsweise einfach durch Einschränkungen mit entsprechenden Betriebsparametern möglich. Das bedeutet, dass mittels der digitalen Karten und auch der freigegebenen Betriebszeiten eine Eingrenzung des Betriebs entsprechend den Vorgaben des Betreibers erfolgen kann.

Um zu gewährleisten, dass das selbstfahrende und individuell abrufbare Personentransportsystem entsprechend den Herstellervorgaben betrieben wird, sind vor der ersten Inbetriebnahme Systemeinrichtung, Personalschulung und -zertifizierung durchzuführen. Das bedeutet, dass das Transportsystem entsprechend den einzuhaltenden Betriebsparametern eingestellt werden muss, was i. A. einen manuellen Betrieb erfordert, bei dem – wie zuvor beschrieben – eine digitale Karte des Betriebsgebiets erstellt wird, sodass die Fahrzeuge während des späteren operativen Betriebs eine akkurate Positionierung vornehmen können.

Zusätzlich ist das Betriebspersonal entsprechend den generellen Fahrzeugeigenschaften sowie bezüglich des speziellen Betriebs zu schulen, d. h., Systemeigenschaften, Betriebsbedingungen, Einschränkungen und andere Charakteristiken müssen vom Betriebspersonal erlernt und verstanden werden. Darüber hinaus ist vor jedem Fahrzeugbetrieb, beispielsweise zu Beginn eines jeden neuen Betriebstages, die Betriebssicherheit ähnlich wie bei Flugzeugen festzustellen, aber auch Sonderfälle im Betrieb wie beispielsweise abweichende Streckenführungen müssen erkundet und im Betriebsprotokoll des Transportsystems festgehalten werden.

Aus diesen Gegebenheiten ist zu erkennen, dass, obwohl die Fahrzeuge selbstfahrend sind, eine beträchtliche Vorbereitung für den Betrieb erforderlich ist, die nicht automatisiert erfolgen kann, sondern durch das Betriebspersonal erfolgen muss. Dennoch ist anzunehmen, dass für den Gesamtbetrieb des Transportsystems deutlich weniger Personal erforderlich ist, als wenn für jedes Fahrzeug zu jedem Zeitpunkt ein individueller Fahrer eingesetzt werden müsste.

### 14.3.3 Geschäftsmodell

Einer der Hauptgründe für den Einsatz von selbstfahrenden und individuell abrufbaren Personentransportsystemen ist der deutlich geringere Personalaufwand im Vergleich zum Betrieb mit konventionellen Fahrzeugen. Dies hat auch Einfluss auf das Geschäftsmodell. Der Anbieter des Navia-Systems gibt an, dass die Betriebskosten für den Personentransport

damit um ca. 50 Prozent gesenkt werden können [7]. Das Geschäftsmodell für derartige Systeme besteht also darin, die Mobilitätsleistung durch die Einsparung von Personal deutlich günstiger anzubieten als beispielsweise mit einem Taxidienst. Gegenüber dem individuell genutzten Pkw ergibt sich der Vorteil, dass der Nutzer nicht auch die Fahraufgabe übernehmen muss, sondern anderen Beschäftigungen wie Arbeit, Freizeit oder Ausruhen nachgehen kann.

Darüber hinaus können keine weiteren betriebswirtschaftlichen Vorteile ausgewiesen werden, da ein individuell abrufbarer Betrieb auch mit konventionellen, von Menschen gesteuerten Fahrzeugen möglich wäre. Der Vorteil der selbstfahrenden Fahrzeuge ist allerdings, dass sie auch zu betriebswirtschaftlich unattraktiven Zeiten betrieben werden können, so z. B. nachts, wenn vielleicht nur einmal pro Stunde eine Fahrt von zehn Minuten Dauer angefordert wird. Ein Fahrer müsste dabei 50 Minuten warten, ohne weitere Einnahmen zu haben. Wenn dagegen das selbstfahrende Fahrzeug für 50 Minuten steht, wäre die Wartezeit unerheblich, solange die Gesamtnutzung für den betriebswirtschaftlichen Betrachtungszeitraum profitabel ist.

Bisher sind die Transportsysteme allerdings nur im Pilotbetrieb eingesetzt worden, so beispielsweise zu eingeschränkten Zeiten in Universitäts- oder Einkaufszentren [3, 4, 5]. Da diese Einsätze vorrangig der Vorführung des Systemkonzepts galten, kann das Geschäftsmodell noch nicht vollständig bewertet werden. Mit einem projektierten Einsatz der Fahrzeuge im kommerziellen Betrieb ab 2015 werden dann das Geschäftsmodell sowie Umsatzziele der Betreiber und Hersteller dieser Transportsysteme bewertbar sein.

---

## 14.4 Erfahrungen bei der Umsetzung des Transportsystems

Der folgende Abschnitt soll einen Überblick über die Erfahrungen bei der Umsetzung des selbstfahrenden und individuell abrufbaren Personentransportsystems „Navia“ der Firma Induct an der Stanford Universität geben. Da die Fahrzeuge bis Mitte 2014 nur sporadisch im Einsatz waren, ist dies ein erster Erfahrungsbericht, der an anderer Stelle und zu späterer Zeit fortgesetzt werden soll. Allerdings können jetzt schon Erfahrungen über die Vorgehensweise bei der Einführung vermittelt werden, die für andere Wissenschaftler und Verkehrsplaner bei der Umsetzung ähnlicher Transportsysteme hilfreich sein können.

### 14.4.1 Evaluations-, Versuchs- und Öffentlichkeitsbetrieb

Für die hier dargestellten Fahrzeuge werden entsprechend Tab. 14.1 verschiedene Betriebsphasen betrachtet, um das Transportsystem zunächst in einer Evaluationsphase zu klassifizieren, dann in einer Versuchsphase zu optimieren und schließlich im Öffentlichkeitsbetrieb anzubieten.

Zunächst müssen generelle Erfahrungen mit den Fahrzeugen gesammelt werden, da ein derartiges Transportsystem noch weitestgehend unbekannt und die Risikobewertung damit



**Tab. 14.1** Abgrenzung und Charakteristiken der drei Betriebsphasen

	Evaluation	Versuch	Öffentlichkeit
Zielsetzung	Risikobewertung, Eignung f. Forschung	Forschungsprojekt, Betriebs-optimierung	Personentransport als Dienstleistung
Betriebsgebiet	abgeschlossen, begrenzt	teilöffentlich, begrenzt	öffentlich, begrenzt
Betriebszeiten	begrenzt, Kurzzeitversuch	begrenzt, Langzeitversuch	unbegrenzt, prinzipiell 24h
Nutzergruppe	Projektbeteiligte	ausgewählte Versuchsteilnehmer	generelle Öffentlichkeit
Überwachung	Betriebspersonal am Fahrzeug	Betriebspersonal am Fahrzeug, Funkverbindung	Betriebspersonal in Funkverbindung

schwierig ist. Gleichzeitig ergeben sich weitere Fragestellungen für die Forschung. Das hier verwendete System ermöglicht einen sehr flexiblen Betrieb für die entsprechenden Belange. Für den anfänglichen Evaluationsbetrieb ist es vorteilhaft, dass die Fahrzeuge relativ einfach auf ein gewünschtes Betriebsgebiet eingerichtet und dann vom Betriebspersonal überwacht werden können. Dabei ist es sehr hilfreich, dass die Fahrzeuge kaum eine spezielle Infrastruktur benötigen, sondern nach dem Einrichten weitgehend autark operieren.

Der nachfolgende Versuchsbetrieb, in dem entsprechend den Zielsetzungen des Autonomous Systems Laboratory [8] die räumliche sowie zeitliche Verteilung selbstfahrender und individuell abrufbarer Fahrzeuge zu optimieren ist, soll dann möglichst realitätsnah erfolgen. Das bedeutet, dass Nutzer des Systems sich trotz des Versuchsbetriebs wie im Fall eines realen Mobilitätsbedarfs verhalten können. Also sollen sie beispielsweise einen Fahrtgrund haben, warum sie mit einer möglichst kurzen Warte- und Fahrtzeit von einem Ort zum anderen kommen wollen. Auch dieser Betrieb ist mit dem verwendeten Transportsystem recht flexibel und zielgerichtet darzustellen, da die angebotenen Fahrtrouten sowie Haltestellen vergleichsweise einfach zu programmieren sind und damit die Anforderungen für den Versuchsbetrieb effizient umgesetzt werden können.

Der Versuchsbetrieb würde schließlich in den eigentlichen Öffentlichkeitsbetrieb übergehen, in dem bis auf Weiteres keine wissenschaftlichen Untersuchungen oder Optimierungen mehr geplant wären, sondern der Betrieb entsprechend den Ergebnissen aus dem Versuchsbetrieb umgesetzt wird. Das hier verwendete Transportsystem ermöglicht diese schrittweise Einführung, da das Betriebsgebiet und die Betriebszeiten recht einfach festzulegen sind und aufgrund der geringen Fahrgeschwindigkeit und Fahrstrecke eine Betriebsüberwachung problemlos ist.

### 14.4.2 Auswahl des Fahrzeugkonzepts

Um den Anforderungen für den Versuchsbetrieb gerecht zu werden, ist ein vollautomatisiertes, d. h. ohne Fahrer operierendes Fahrzeug erforderlich, das innerhalb gegebener Grenzen selbstfahrend ist und von Nutzern individuell abgerufen werden kann. Zusätzlich ist eine offene Betriebsarchitektur erforderlich, sodass die Bereitstellung und Verteilung der Fahrzeuge für den Versuchsbetrieb variiert werden können. Die Fahrzeuge selbst müssen nicht notwendigerweise über eine offene Architektur verfügen; das Betriebssystem der individuellen Fahrzeugsteuerung oder die Umfelderkennung sind nicht Gegenstand der Forschungsarbeiten und brauchen deswegen auch nicht weiter beeinflusst oder gar verändert zu werden.

Die von der Firma Induct angebotenen Fahrzeuge „Navia“ mit der zugehörigen Betriebsarchitektur erfüllen diese Anforderungen. Zusätzlich liegen bereits Erfahrungen von anderen Implementierungen dieses Mobilitätskonzepts vor [3, 7], was einen stabilen Versuchsbetrieb erwarten lässt. Darüber hinaus hat Induct seine Schutzrechte bezüglich des Navia vorwiegend auf dem Gebiet der Umfelderkennung und Erstellung des Referenzsystems für die Fahrzeugautomatisierung, sodass die hier betrachtete Forschungsarbeit auf dem Gebiet des übergeordneten Fahrzeugbetriebs zur optimalen Nachfragebedienung kaum eine Überschneidung darstellt, sondern vielmehr eine Ergänzung. Aus diesen Gründen heraus wurde das Induct Navia-Konzept für die Arbeiten des Autonomous Systems Laboratory an der Stanford Universität [8] für den Versuchsbetrieb in Betracht gezogen und entsprechend den in den nachfolgenden Abschnitten benannten Kriterien bewertet.

### 14.4.3 Risikobewertung und Rechtseinordnung

Die Einordnung in das Rechtssystem erfolgt für den hier betrachteten Einsatzfall schrittweise. Da die Fahrzeuge zunächst für die Evaluation in nicht allgemein zugänglichen Gebieten betrieben werden, gelten dort Sonderregelungen bezüglich Fahrzeugbetrieb und Betriebshaftung. Diese konnten an der Stanford Universität im Einvernehmen mit der Abteilung für Risikobewertung sowie der Rechtsabteilung formuliert werden. Die Haftung wird im Wesentlichen beim Betreiber der Fahrzeuge belassen, was je nach Betriebszustand das im bzw. am Fahrzeug anwesende oder über Funküberwachung verbundene Betriebspersonal ist. Der Betrieb der Fahrzeuge wird mit entsprechenden Auflagen der internen (d. h. der Stanford Universität angehörigen) Stellen für Risikobewertung zugelassen.

Die Risikobewertung für den hier betrachteten Betriebsfall ist deutlich einfacher planbar als dies für den öffentlichen Straßenverkehr der Fall ist, da sowohl die Fahrgeschwindigkeit als auch das Einsatzgebiet deutlich begrenzt sind. Das bedeutet, dass anders als bei konventionellen Pkw, die deutlich schneller und prinzipiell überall fahren können, die Begrenzung auf maximal 20 km/h und ein eng umrissenes Gebiet zu einem vergleichsweise geringen Betriebsrisiko führen. Im Einsatzgebiet wird für den hier betrachteten Fall zunächst nur der Betrieb unter Ausschluss der Öffentlichkeit bzw. unter direkter Aufsicht durch das Betriebspersonal, unmittelbar im oder am Fahrzeug, zugelassen. Diese Beschrän-

kungen erlauben es, über erste Schritte beim Betrieb der Fahrzeuge allen Projektbeteiligten ein Verständnis für die Möglichkeiten, Beschränkungen und weiteren Eigenschaften zu vermitteln. Damit können dann schrittweise die Risikobewertung und Rechtseinordnung vorgenommen und letztlich auch der eigentliche Versuchsbetrieb ausgeweitet werden. Das bedeutet, dass Risikobewertung und Rechtseinordnung aufgrund des neuen und weitgehend unbekanntem Charakters der Fahrzeuge am praktischen Beispiel erfolgen und kaum im Voraus festgelegt werden können.

Mit der zunehmenden Ausweitung des Betriebes auf den Versuchs- und dann den Öffentlichkeitsbetrieb (s. Tab. 14.1) gelten zunehmend öffentliche Gesetzgebungen, sofern die Fahrzeuge auf öffentlichen Straßen betrieben werden. Für den hier betrachteten Anwendungsfall gelten die kalifornischen Regelungen, die in der ersten Hälfte des Jahres 2014 noch in einer abschließenden Gesetzgebungsphase waren. Dabei ist besonders anzumerken, dass ab September 2014 nur noch *Fahrzeughersteller* Versuche mit „autonomen“ (also selbstfahrenden oder vollautomatisierten) Fahrzeugen vornehmen dürfen [9]. Da als „Fahrzeughersteller“ definiert wird, wer ein Fahrzeug zu einem „autonomen“ Fahrzeug verändert, wird an dieser Stelle zu sehen sein, auf welchen Verkehrswegen die Fahrzeuge an der Stanford Universität bewegt werden und wer der Fahrzeughersteller im Sinne der kalifornischen Gesetzgebung ist. Solange die Fahrzeuge von der Stanford Universität nicht im Sinne der Automatisierung verändert, sondern lediglich Daten über deren Position, Zeitverhalten und Nutzeranforderungen ausgewertet und optimiert werden, wird erwartet, dass nicht die universitären Wissenschaftler als der Fahrzeughersteller im Sinne des Gesetzes anzusehen sind, sondern der eigentliche Hersteller der Fahrzeuge, von dem die Stanford Universität diese bezogen hat.

Allerdings ist die Gesetzeslage derzeit schwer vorherzusagen, da sie sich noch in der Entstehungsphase befindet. Es ist zu erwarten, dass auf den verschiedensten gesetzgebenden Ebenen (d. h. auf bundesstaatlichen, kommunalen, aber auch nationalen Ebenen) noch Veränderungen auftreten werden, auf die zu reagieren sein wird. Generell scheint sich für das hier betrachtete Betriebsgebiet, d. h. eine innovative Universität in Kalifornien, eine sehr positive Grundhaltung der Verantwortlichen und der Öffentlichkeit gegenüber automatisierten Fahrzeugen zu ergeben. Und auch die gesetzgebenden Organe scheinen eher eine unterstützende und wohlwollende Haltung einzunehmen. Es ist auch zu verspüren, dass im Einzelfall Sonderregelungen erreicht werden können, um einen Betrieb zu ermöglichen, der durch die Gesetzeslage möglicherweise nicht eindeutig definiert ist. Eine derartige Grundhaltung wird auch in anderen Teilen der USA beobachtet, sodass die Gesetzgebung kein grundsätzliches Hindernis bei der Einführung automatisierter Fahrzeuge zu sein scheint, sondern eher eine zusätzliche Überprüfungsinstanz.

#### 14.4.4 Vertragsgestaltung

Für den Betrieb des selbstfahrenden und individuell abrufbaren Transportsystems ist ein Vertrag erforderlich, der im Wesentlichen die Rechtsbeziehung zwischen dem Eigentümer

des Fahrzeugs (für den hier betrachteten Versuchsbetrieb ist das der Hersteller) und dem Nutzer (hier die Stanford Universität als Forschungsbetreiber) festlegt. Darin eingeschlossen sind Rechte und Pflichten bezüglich der generellen Nutzung, Information und Kommunikation, Wartung, Haftung und anderer Bestimmungen für den Versuchsbetrieb.

Im vorliegenden Fall wird ein Leihvertrag für ein selbstfahrendes Fahrzeug zwischen dem Eigentümer und dem Nutzer des Fahrzeugs geschlossen, der zunächst nur für die Evaluationsphase zur Vorbereitung eines eventuellen Forschungsprojekts gilt. Sobald ein konkretes Forschungsprojekt mit dem selbstfahrenden und individuell abrufbaren Personentransportsystem verfolgt würde, wäre ein neuer oder eventuell auch zusätzlicher Vertrag notwendig, der dann für den konkreten Anwendungsfall alle zuvor genannten Gegebenheiten regelt sowie zusätzlich beispielsweise die Möglichkeiten, für Forschungszwecke in die Umfelderkennung und Routenplanung einzugreifen, was für die Evaluationsphase nicht vorgesehen ist.

In dem für die Evaluationsphase eingesetzten Vertrag zwischen Eigentümer und Nutzer der Fahrzeuge wird die Haftung für den Betrieb dem Betreiber auferlegt. Dabei ist der Betreiber die Rechtsperson, die den Betrieb eines solchen Fahrzeugs initiiert und überwacht, also entweder das Betriebspersonal im oder am Fahrzeug oder das Betriebspersonal, welches über eine Funkverbindung mit dem Fahrzeug verbunden ist.

#### **14.4.5 Auswahl des Betriebsgebiets und der Betriebszenarien**

Das Betriebsgebiet für das selbstfahrende und individuell abrufbare Personentransportsystem ist zunächst räumlich zu begrenzen. Für den anfänglichen Evaluations- und anschließenden Versuchsbetrieb mit dem Transportsystem ist weniger die Größe des Betriebsgebiets von Interesse, als vielmehr die Vielfalt der Nutzer, Anwendungsfälle und Betriebs-situationen. Diese können für den Evaluations- und Versuchsbetrieb auch proaktiv als Bestandteil eines Versuchsablaufs dargestellt werden, d. h., Beteiligte des Versuchsprojekts können verschiedene Situationen darstellen, sodass das Verhalten der Fahrzeuge beobachtet und bewertet werden kann. Damit kann ein kleines Betriebsgebiet durchaus ausreichen, um eine Vielzahl von Situationen und Betriebszuständen bewerten zu können.

Da es sich bei dem selbstfahrenden und individuell abrufbaren Personentransportsystem um ein neuartiges Konzept handelt, dessen Risikobewertung nur begrenzt auf der Grundlage von Erfahrungswerten erfolgen kann, muss das Einsatzgebiet so ausgesucht werden, dass zunächst ein realitätsnaher, aber doch vollständig kontrollierbarer Einsatz sichergestellt ist. Das bedeutet, dass entsprechende Nutzer die Fahrzeuge innerhalb des Betriebsgebietes individuell abrufen, ein Fahrziel eingeben und das Fahrzeug die entsprechende Fahraufgabe ohne direkten Einfluss des Betriebspersonals ausführt. Dabei muss das Betriebspersonal aber die Fahrzeuge überwachen können, und es sollte für diesen anfänglichen Versuchsbetrieb auch Kontrolle oder zumindest Wissen darüber haben, welche Personen und Fahrzeuge sich in dem Betriebsgebiet aufhalten und somit mit den Fahrzeugen interferieren könnten.

Die Übersicht über die Personen im Betriebsgebiet ist wichtig, um das Potenzial für Kollisionen oder sonstige Störungen zu erkennen und damit zu minimieren. Beispielsweise sollten sich zu Beginn keinerlei Personen im Betriebsgebiet der Fahrzeuge aufhalten, die nicht mit dem Transportsystem vertraut sind bzw. sich nicht entsprechend den geltenden Vorgaben verhalten (z. B. vor das fahrende Fahrzeug treten). Vielmehr muss sichergestellt sein, dass alle Personen mit den Charakteristiken und Risiken des Transportsystems vertraut sind, sich aber dennoch wie reale Nutzer verhalten, die die Fahrzeuge anfordern und Fahrziele eingeben. Dabei kann in Betracht gezogen werden, dass alle Personen, die mit den Fahrzeugen interagieren, ihre Einverständniserklärung abgeben, dass sie mit den Eigenschaften und Beschränkungen vertraut sind und ihr eigenes Verhalten dementsprechend ausrichten werden.

Nach einem anfänglich stark eingeschränkten Betriebsgebiet, welches aufgrund der zuvor beschriebenen Gründe eventuell sogar eingezäunt und nur mit besonderer Genehmigung zugänglich sein mag, sollte der Betrieb auf ein zwar überwachtes, aber ansonsten öffentliches Betriebsgebiet erweitert werden, damit eine große Anzahl von realen Nutzern ermöglicht wird. Das bedeutet, dass die Nutzer in dieser Phase keine Vorkenntnis bezüglich des Systems haben und auch keine gesonderte Einverständniserklärung abgeben, sondern die Fahrzeuge genauso benutzen wie beispielsweise ein Taxi oder einen Bus. Dafür ist es wichtig, dass das Betriebsgebiet einen Bereich beschreibt, in dem die Nutzer einen Mobilitätsbedarf haben, für den die hier betrachteten Fahrzeuge aufgrund der Reichweite, Fahrgeschwindigkeit und Transportkapazität eine reale Lösung darstellen.

Eine Universität wie Stanford hat die Möglichkeit, die hier beschriebenen Anforderungen umzusetzen: Der Universitätscampus hat eine Ausdehnung, die für ein Fahrzeug wie den Navia befahrbar ist; der Transportbedarf für Personen und Gegenstände ist hoch; die Verkehrsbelange werden weitestgehend von der zuständigen Abteilung der Universität (Parking & Transportation Services) koordiniert. Damit kann für den anfänglichen Evaluationsbetrieb ein abgegrenztes Gebiet ausgewiesen werden, zu dem nur Versuchsbeteiligte Zugang haben. In der nächsten Phase können dann beispielsweise Fußgängerzonen und Straßen ausgewiesen werden, auf denen die Fahrzeuge betrieben werden. In allen Fällen lässt sich sicherstellen, dass die erforderlichen Kommunikationssysteme zur Überwachung durch das Betriebspersonal zur Verfügung stehen und das Personal bei Bedarf Zugang zu den Fahrzeugen hat.

Nachdem bekannt geworden war, dass die Navia-Fahrzeuge an der Stanford Universität eingesetzt werden sollen, ergeben sich sehr schnell mehrere Anfragen von interessierten Abteilungen, das Transportsystem einzusetzen. Diese Anfragen kommen von den Betreibern der lokalen Busse, um eine punktuelle und flexible Erweiterung des Linienbetriebs anzubieten; von den Versorgungs- sowie Instandsetzungsabteilungen, um einen flexiblen und personalungebundenen Transport von Gegenständen auf dem Campus zu ermöglichen; sowie von den Betreibern einer separaten Forschungseinrichtung, um einen Personentransport auf dem abgegrenzten Forschungscampus einzurichten.

Unter Berücksichtigung der vorhandenen Anfragen und Möglichkeiten wird zunächst der Betrieb auf einem zugangsgeregelten Parkplatz verfolgt, wo verschiedene Betriebs-

szenarien nachgestellt werden können. Danach wird der realitätsnahe Einsatz auf dem Gelände der separaten Forschungseinrichtung geplant, wo eine größere Zahl realer Nutzer erwartet wird und jederzeit eine vollständige Überwachung des Betriebs gewährleistet werden kann.

Zu Beginn des Evaluationsbetriebs sind dann spezielle Szenarien abzubilden, die die Risikobewertung und entsprechende Sicherheitstests ermöglichen. Dafür sind die Fahrzeuge beispielsweise mit Hindernissen und anderen Objekten zu konfrontieren. Es sollen reale sicherheitsrelevante Situationen abgebildet werden, in denen die Fahrzeuge sich in geforderter Art und Weise so verhalten, dass sich keine kritischen Betriebszustände ergeben. Die Objekte, mit denen die Fahrzeuge konfrontiert werden, sind Fußgänger, Radfahrer, Fahrzeuge aller Art, Tiere und ganz allgemein Gegenstände, die es in dem Betriebsgebiet gibt, wie beispielsweise Mülltonnen, Pakete, Kartons, Arbeitsmaterial, Pflanzen, Gebäude usw.

Dabei sind stationäre von beweglichen Objekten zu unterscheiden, da erstere in der digitalen Umgebungskarte definiert werden können und die Bahn der Fahrzeuge dementsprechend vorgegeben werden kann. Bewegliche Objekte – in diesem Fall auch solche Objekte, die nur selten und nur durch Fremdeinwirkung bewegt werden können wie z. B. ein Schuttcontainer – müssen vollständig von der Umfeldsensorik erfasst werden, um eine Kollision zu vermeiden. Je nach Eigenart des Objekts sind Betriebsszenarien zu definieren, sodass ein für die Risikobewertung und für Sicherheitstests relevantes Verhalten dargestellt wird: Personen und Fahrzeuge sollten relativ kurzfristig und schnell vor das Fahrzeug gelangen können, Mülltonnen und Pakete eher langsamer. Für alle diese Objekte ist das Verhalten der Fahrzeuge dahingehend zu bestimmen, inwieweit das Objekt rechtzeitig und zuverlässig genug erkannt und eine Kollision vermieden wird.

#### **14.4.6 Einrichtung des Transportsystems und Zertifizierung des Personals**

Der Hersteller der Fahrzeuge legt fest, wie das Transportsystem mit den selbstfahrenden Fahrzeugen einzurichten ist. Dazu erfolgt zunächst die Festlegung der Route, die dann mit einem der Fahrzeuge in einem speziellen Betriebsmodus befahren wird, um die digitale Karte des Betriebsgebiets zu erstellen. Die Betriebsdaten werden anschließend editiert, um stationäre und bewegliche Hindernisse zu kategorisieren. Der Hersteller stellt abschließend über die Einsatzart und das Betriebsgebiet ein Dokument aus, das die Parameter und Begrenzungen definiert und damit den zulässigen Betrieb auch für eventuelle Haftungsfragen genau festlegt. Diese Festlegungen werden in einem Zertifikat des Herstellers dokumentiert.

Zur Zertifizierung des Betriebspersonals erfolgt eine Einweisung durch den Hersteller, bei der operative Anforderungen, funktionale Merkmale, Betriebsarten, technische Details, Einschränkungen, Risiken usw. erklärt werden und das Verständnis des Systems im praktischen Umgang erlernt und dann auch abgeprüft werden. Der Hersteller dokumentiert die Zertifizierung und beurkundet damit, welche Personen die Ausbildung absolviert haben

und mit dem System vertraut sind. Festgelegt ist auch anhand der drei Stufen „Betrieb“, „Einrichtung“ und „Wartung/Modifikation“, ob die Personen das System lediglich betreiben, für den Betrieb einrichten oder auch warten und verändern dürfen.

Diese Abläufe und Umfänge müssen zunächst vom Hersteller der Fahrzeuge vorgegeben sein, da dieser die beste Kenntnis über das System sowie deren Risiken hat. Um eventuelle Besonderheiten der Betriebsumgebung zu berücksichtigen, sollte allerdings der Betreiber des Systems (d.h. nicht der Hersteller, sondern der verantwortliche Beobachter vor Ort oder in Funkverbindung) Änderungen oder Erweiterungen für Systemtest, Wartung und Zertifizierung vornehmen, da hier Sondersituationen am ehesten offenbar werden. Wenn in Zukunft derartige selbstfahrende und individuell abrufbare Transportsysteme weitere Verbreitung erfahren und damit die Gesetzgeber auch mehr Erfahrung gesammelt haben, sind entsprechende Abläufe und Umfänge für die Zertifizierung von Fahrzeug und Personal wahrscheinlich eher vom Gesetzgeber oder von beauftragten Institutionen zu erstellen.

#### **14.4.7 Systemstart und Betriebsüberwachung**

Für den eigentlichen Betrieb der Fahrzeuge gibt der Hersteller einen Systemstart mit einer entsprechenden Systemüberprüfung vor. Dabei wird eine Vielzahl von Fahrzeug- und Umgebungsparametern überprüft, bevor die Freigabe für den eigentlichen Betrieb erfolgt. Der vorgegebene Ablauf stellt einen guten Kompromiss aus Detailgenauigkeit und Handhabbarkeit dar, sodass vor jedem Betrieb Gewissheit besteht, dass sowohl das Transportsystem als auch die Betriebsumgebung den Sicherheits- und Funktionsanforderungen entsprechend dem zertifizierten Betrieb genügen. Ebenso sind Wartungsumfänge mit verschiedenen Intervallen vorgegeben, die Sicherheit und Funktion langfristig sicherstellen sollen.

Für den Betrieb der Fahrzeuge im Falle einer Funküberwachung (d.h. kein Betriebspersonal befindet sich unmittelbar im oder am Fahrzeug) sieht der Hersteller eine redundante Kommunikation vor. Dazu werden zwei voneinander unabhängige drahtlose Kommunikationssysteme, beispielsweise Mobiltelefon- und WLAN-Netz oder zwei unabhängige Mobiltelefonnetze, implementiert, über die das Betriebspersonal Fahrzeugdaten abrufen, gegebenenfalls einen Nothalt einleiten oder auch mit den Insassen des Fahrzeugs kommunizieren kann. Die genauen Überwachungsumfänge, beispielsweise Position, Geschwindigkeit, Fahrtrichtung, Insassen und Türverriegelung oder aber auch die komplette Videoüberwachung der Umgebung, sind individuell festzulegen, jedoch derzeit (Juni 2014) noch nicht genau bestimmt.

Bisher wurden die Fahrzeuge an der Stanford Universität nur mit dem Betriebspersonal unmittelbar im oder am Fahrzeug und mit direktem Zugriff auf einen Notfallschalter betrieben. Aus diesem Grund liegen noch keine erweiterten Erfahrungen zum Betrieb mit Funküberwachung vor. Allerdings ist bereits aus dieser begrenzten Erfahrung die Wahrscheinlichkeit zu erkennen, dass eine Kollision eher auf einen anderen Verkehrsteilnehmer (Fußgänger, Radfahrer, anderes Fahrzeug) zurückzuführen ist als auf das Fahrzeug selbst.

Die Kombination der verwendeten Umfelderkennung, Objektklassifizierung und Routenbestimmung ist also geeignet – ganz besonders in Anbetracht der geringen Fahrgeschwindigkeit und des bekannten sowie begrenzten Betriebsumfelds –, um das Fahrzeug sehr sicher und störungsfrei zu führen.

Für den späteren Betrieb mit Funküberwachung wird zu bewerten sein, wie schnell das Betriebspersonal im Störfall vor Ort sein könnte. So könnte es vorkommen, dass die vorprogrammierte Route durch Baumaßnahmen oder auch widerrechtlich geparkte Fahrzeuge versperrt ist. In solch einem Fall würden die Fahrzeuge den Betrieb selbsttätig unterbrechen und die Betriebsstelle informieren. Je nachdem, wo das Betriebspersonal dann lokal angesiedelt ist, wird eine Zeit in der Größenordnung von Minuten oder auch deutlich länger vergehen, bis jemand vor Ort sein wird, um die Störung zu beheben. Dieses Modell ist dem Betrieb von Fahrstühlen entnommen, wo die Notruftaste auch einen sofortigen Kontakt zu einer Betriebszentrale herstellt, das Betriebspersonal möglicherweise aber eine längere Zeit benötigt, bis es vor Ort sein kann. Wie die Nutzer und Insassen des selbstfahrenden und individuell abrufbaren Personentransportsystems damit umgehen bzw. ob diese Zeitdauer ein Problem darstellt, ist im späteren Öffentlichkeitsbetrieb zu ermitteln. Im Unterschied zum Fahrstuhl ist aber festzuhalten, dass die Passagiere des Transportsystems aufgrund der offenen Bauweise zu jeder Zeit direkten Kontakt zur Umgebung haben und die Fahrzeuge (s. Abb. 14.2) im Notfall auch vergleichsweise einfach verlassen können.

#### **14.4.8 Information für Nutzer und Passanten**

Da es sich bei dem selbstfahrenden und individuell abrufbaren Personentransportsystem um eine Neuerung im Personentransport handelt, müssen die Nutzer über die Möglichkeiten und Risiken aufgeklärt werden. Zunächst sollte der normale Betrieb erläutert werden, d. h. die eigentliche Bedienung ist zu beschreiben. Hierfür sollte nur ein Mindestmaß an Beschreibung vorgesehen werden, da das Transportsystem eine ähnliche Nutzung wie ein Taxi oder Bus ermöglichen soll, die beide auch keine Beschreibung erfordern. So ist eher auf die Risiken und auf die speziellen Aspekte des Versuchsbetriebs hinzuweisen. Das beinhaltet eine Aufklärung über die Grenzen des Systems und dessen Gefahren, wie beispielsweise die Möglichkeit, dass ein Objekt nicht rechtzeitig erkannt wird, aber auch das Verhalten im Ausnahmefall.

Die Nutzer für den Evaluations- und Versuchsbetrieb werden über die Eigenschaften und Risiken in einer schriftlichen Information aufgeklärt. Dazu gehört auch die Information, an wen sich die Nutzer in einem eventuellen Schadensfall als rechtlich Verantwortlichen wenden sollen. Ähnlich sind im späteren Öffentlichkeitsbetrieb Möglichkeiten vorzusehen, dass die Nutzer dem Betreiber Rückmeldung und Fragen zukommen lassen können. Da es sich um ein neues Transportsystem handelt, ist die Nutzerbewertung von großer Bedeutung; deswegen ist es wichtig, dass die Nutzer wissen, an wen sie sich wenden können.

Ebenso wie die eigentlichen Nutzer des selbstfahrenden Transportsystems müssen auch Passanten und andere Verkehrsteilnehmer über den Betrieb der Fahrzeuge aufgeklärt



werden. Zwar ist nicht unbedingt Wissen über die Nutzung erforderlich, angesichts der Interaktion zwischen den Fahrzeugen und anderen Verkehrsteilnehmern müssen diese aber über die Möglichkeiten und Risiken in Kenntnis gesetzt werden. Das schließt ganz besonders auch Vorfahrtsregelungen oder Sonderregelungen mit ein. Passanten und andere Verkehrsteilnehmer sollten wissen, wie sie die Fahrzeuge im Notfall gegebenenfalls von außen stoppen können, indem sie den Notfallschalter betätigen. Auch sollte den Passanten der offizielle Betreiber der Fahrzeuge bekannt sein, an den sie sich mit Rückmeldungen und Fragen wenden können.

#### 14.4.9 Öffentliche Reaktionen

Auch wenn das selbstfahrende und individuell abrufbare Personentransportsystem bisher nur in begrenztem Maße in der Öffentlichkeit an der Stanford Universität zu sehen war (das war bislang nur der Fall, wenn das Fahrzeug vom Betriebspersonal gesteuert zu einem anderen Betriebsgebiet überführt wurde), kann über die öffentlichen Reaktionen doch schon einiges ausgesagt werden. Diese Beobachtungen wurden bei Überführungsfahrten und Besuchen beim Evaluationsbetrieb, aber auch an der Parkposition der Fahrzeuge gemacht.

Dabei sei ganz besonders betont, dass es sich bei den folgenden Beschreibungen nicht um eine methodische Studie handelt, sondern eher um zufällige Beobachtungen, die für weitere Untersuchungen Anregung geben sollen.

Generell gilt, dass die Öffentlichkeit, also alle Unbeteiligten an diesem Projekt, sehr positiv auf das Fahrzeug reagieren. Das mag zwei Hauptursachen haben:

Zum einen scheinen unbeteiligte Passanten oder Betrachter generell sehr interessiert und neugierig in Bezug auf automatisierte Fahrzeuge zu sein. Das liegt möglicherweise daran, dass derartige Technologien derzeit sehr intensiv in der allgemeinen Medienberichterstattung behandelt werden, aber auch in populärwissenschaftlichen Beiträgen und Fachartikeln ein zentrales Thema sind. Vor allem die allgemeinen Medien berichten häufig sehr positiv und zuweilen sogar euphorisch über „autonome“ Fahrzeuge, bei denen der Mensch die Fahraufgabe komplett an den Computer übergibt und zwischen Start und Ziel anderen Tätigkeiten nachgehen kann. Wenn Menschen unter diesem Eindruck zum ersten Mal ein solches Fahrzeug sehen, sind Neugierde, Offenheit und Vertrauensvorschuss vermutlich naheliegende Reaktionen, die immer wieder beobachtet werden konnten.

Zum anderen trägt der Charakter des hier betrachteten Fahrzeugs zu einer spontanen, positiven Reaktion von Passanten und Betrachtern bei. Das Fahrzeug hat eine sehr offene Bauweise (s. Abb. 14.2), so z. B. offene Seitenwände ohne Fenster oder eine offene Reling anstelle einer geschlossenen Tür. Durch diese Bauweise sind die Insassen des Fahrzeugs klar zu erkennen und für Passanten wahrnehmbar, was einen positiven Eindruck vermittelt. Das bedeutet, das Erscheinungsbild ist ganz anders, als wenn das Fahrzeug beispielsweise getönte Scheiben und geschlossene Türen hätte, sodass Passanten nicht wüssten, wer in dem selbstfahrenden Fahrzeug unterwegs ist. Ähnliches kann beispielsweise im öffentli-

chen Straßenverkehr beobachtet werden, wenn man die Eindrücke vergleicht, die beispielsweise eine verdunkelte Limousine oder ein offenes Cabrio vermitteln. Für das hier betrachtete Fahrzeug kommt hinzu, dass das Design Elemente aus dem Bootsbau aufgreift, so beispielsweise weißen Kunststoff für den Aufbau, beigefarbenes Kunstleder für die Passagierplätze, helles Teakholz für den Fußboden sowie ein nahezu segelartiges Dach. Die Reaktionen von Betrachtern des Fahrzeugs reichen von „Landyacht“ bis hin zu „Whirlpool auf Rädern“ – alles positive Assoziationen, die den ersten Eindruck bestimmen.

Darüber hinaus ist das Fahrzeug vergleichsweise langsam; es operiert oft kaum schneller als mit Schrittgeschwindigkeit. Dadurch bekommen Passanten den Eindruck von Sicherheit: Fußgänger empfinden, dass sie zur Not schnell beiseitretreten könnten; Autofahrer fühlen sich diesem Fahrzeug wahrscheinlich „überlegen“, was auch an dessen weitestgehend aus Plastikteilen bestehendem Erscheinungsbild liegen mag. Aufgrund dieser Fahrzeugcharakteristiken – offenes und positives Erscheinungsbild sowie langsame Fahrgeschwindigkeit – ergibt sich, dass Unbeteiligte dem Fahrzeug nahezu einen persönlichen Charakter zuordnen, ähnlich wie das beispielsweise in Filmen wie „Nr. 5 lebt“, „Matrix“ oder „Krieg der Sterne“ der Fall ist. Auch dort ist zu beobachten, dass Robotern je nach Erscheinungsbild und Leistungsfähigkeit bzw. Aggressivität (ausgedrückt durch Fahrgeschwindigkeit) unterschiedliche Charaktere zugeordnet werden. Diese Eigenschaften und Mechanismen sollten vorsichtig in Betracht gezogen werden, wenn ein selbstfahrendes Fahrzeug in der Öffentlichkeit eingesetzt wird. Es scheint so zu sein, dass der Charakter eines Fahrzeugs ein wichtiger Bestandteil ist, um in der Öffentlichkeit positive Reaktionen zur Fahrzeugautomatisierung auszulösen, d.h. dass das automatisierte Fahrzeug durch entsprechende Mechanismen entweder als „untergebener Diener“ oder „rücksichtsloser Söldner“ wahrgenommen wird (s. hierzu auch Kap. 3).

Aus den Begegnungen mit Passanten und Beobachtern ergeben sich immer wieder viele Fragen zu dem selbstfahrenden und individuell abrufbaren Personentransportsystem. Die häufigste Frage ist, wann und wo diese Fahrzeuge in der Öffentlichkeit nutzbar sein werden. Andere Fragen beziehen sich auf technische Spezifikationen der Fahrzeuge. Mitunter wird auch gefragt, ob und wie die Fahrzeuge auf Objekte reagieren, wobei ganz gezielt nach Fußgängern, Hunden, Katzen oder stationären Hindernissen gefragt wird. Gelegentlich ergeben sich auch Fragen zur Überwachung und Betriebshaftung der Fahrzeuge. Diese Fragen belegen allgemein das öffentliche Interesse an den Fahrzeugen und auch, dass die Öffentlichkeit sich viele Gedanken zum Betrieb sowie zu Beschränkungen von automatisierten Fahrzeugen macht. Das unterstreicht auch, dass eine Aufklärung und Information der Öffentlichkeit vor bzw. während des Betriebs dieser Fahrzeuge wichtig ist.

---

## 14.5 Zusammenfassung und Ausblick

Der Beitrag beschreibt die ersten Schritte zur Einführung eines selbstfahrenden und individuell abrufbaren Personentransportsystems. Bei dem Transportsystem handelt es sich um Fahrzeuge, die per Smartphone-App abrufbar sind und Personen innerhalb eines fest-

gelegten Gebiets, wie beispielsweise eines Innenstadtbereichs, ohne direkte Eingriffsmöglichkeit und ohne Schienenführung befördern. Im hier beschriebenen Beispiel sollen diese Fahrzeuge an der Stanford Universität für wissenschaftliche Untersuchungen auf dem Gebiet innovativer Mobilitätslösungen mittels selbstfahrender Transportsysteme betrieben und dazu zunächst bezüglich ihrer Tauglichkeit für diese Arbeiten bewertet werden.

In den ersten Schritten wurden die Risikobewertung sowie Rechtseinordnung vorgenommen und dann das Betriebsgebiet sowie die Betriebsszenarien festgelegt. Dabei zeigte sich, dass zwar auf bestehende Regelungen und Vereinbarungen aufgebaut werden kann, das hier betrachtete Transportsystem durch den selbstfahrenden Charakter aber Anforderungen hat, die deutlich über das Bestehende hinausgehen. Dabei war es in allen Fällen von Vorteil, dass die Fahrzeuge langsam fahren (maximal 20 km/h) und ihr Einsatzgebiet begrenzt ist. Zusätzlich ist Betriebspersonal entweder direkt im oder am Fahrzeug oder per Funkverbindung mit dem Fahrzeug verbunden, was die Ersteinführung eines solchen Systems erleichtert.

Bei den notwendigen internen Koordinationsaufgaben sowie zu erstellenden Regelungen hat es sich als sehr wichtig erwiesen, den Betroffenen bzw. Entscheidern das Transportsystem im realen Einsatz vorzuführen, sodass das Betriebsrisiko sowie Möglichkeiten und Grenzen der Fahrzeuge realistisch eingeschätzt werden können. Das offene und positive Erscheinungsbild der Fahrzeuge gepaart mit großem Interesse sowie Neugierde in der Öffentlichkeit trägt dazu bei, dass die Fahrzeuge positive Reaktionen auslösen. Daran sind auch Erwartungen von Verbrauchern geknüpft, dass selbstfahrende Fahrzeuge in absehbarer Zeit vielen das oftmals lästige Autofahren in der Stadt abnehmen werden.

Die Unsicherheiten bei der Einführung des selbstfahrenden Personentransportsystems sind neben infrastrukturellen, betriebswirtschaftlichen sowie unternehmerischen Variablen durchaus auch die gesetzlichen Rahmenbedingungen. In dem hier betrachteten Beispiel der Einführung eines solchen Transportsystems an der Stanford Universität, die letztlich einen lokalen Rechtsbereich innerhalb des Bundesstaats Kalifornien darstellt, zeigt sich, dass der Betrieb auf Stanford-eigenem Gebiet vorteilhaft ist, da die Universität hier entsprechende Regelungen vorgeben kann. Allerdings wird derzeit für Kalifornien eine Gesetzesregelung für den Betrieb automatisierter Fahrzeuge verfasst, die dann für Durchgangsstraßen an der Universität auch rechtswirksam wäre. Damit wird in naher Zukunft zu sehen sein, wie die Rechtsprechung derartige selbstfahrende Fahrzeuge behandelt und wie der Betrieb bzw. die Ausführung des Transportsystems geartet sein muss.

Abschließend ergibt sich für den Ausblick zumindest aufgrund der hier gefundenen ersten Erfahrungen eine weitgehend positive Grundstimmung, als dass der Einführung selbstfahrender Transportsysteme in der Öffentlichkeit sehr wohlwollend gegenüberstanden bzw. diese gefördert wird. Es ist dabei allerdings anzumerken, dass diese ersten Eindrücke noch keine repräsentative Studie darstellen, sodass noch weitere Arbeiten zu Umsetzung und Akzeptanz selbstfahrender Fahrzeuge vorgeschlagen werden. Insgesamt ist damit aber zu hoffen, dass selbstfahrende und individuell abrufbare Personentransportsysteme langfristig einen deutlichen Beitrag zur Verbesserung der Individualmobilität in Städten leisten werden.

## Literatur

1. SAE International, "Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems" (16. Jan 2014)
2. Induct Navia Produktbeschreibung, Unternehmenswebseite, <http://induct-technology.com/en/products/navia-the-100-electric-automated-transport> (abgerufen 28. Jun 2014)
3. "Induct presents world's first fully-electric driverless shuttle: the Navia", Induct Pressemitteilung, <http://induct-technology.com/en/files/2012/12/Navia-press-release.pdf> (6. Dez 2012, abgerufen 28. Jun 2014)
4. "Le Cybus d'Inria en démonstration à la Rochelle", INRIA Pressemitteilung, <http://www.inria.fr/content/download/9864/353310/version/1/file/Cybus-Inria.pdf> (12. Mai 2011, abgerufen 28. Jan 2014)
5. Counts, N., "SMART Driverless golf cart provides a glimpse into a future of autonomous vehicles", MIT News, <http://newsoffice.mit.edu/2013/smart-driverless-golf-cart-provides-a-glimpse-into-a-future-of-autonomous-vehicles> (9. Dez 2013, abgerufen 28. Jun 2014)
6. "AKKA link&go 2.0 electric self-driving concept designed for future cities", Designboom, <http://www.designboom.com/technology/akka-linkgo-2-0-electric-driverless-concept-car-for-the-city-of-the-future-03-12-2014/> (12. Mrz 2014, abgerufen 28. Jun 2014)
7. "Induct Launches Navia, The First 100 Percent Electric, Self-Driving Shuttle In The U.S.", Induct Pressemitteilung, <http://www.prnewswire.com/news-releases/induct-launches-navia-the-first-100-percent-electric-self-driving-shuttle-in-the-us-238980311.html> (6. Jan 2014, abgerufen 28. Jun 2014)
8. Zhang, R., Pavone, M., "Control of Robotic Mobility-On-Demand Systems: a Queueing-Theoretical Perspective", Robotics: Science and Systems Conference (2014)
9. "DMV Adopts Autonomous Vehicle Testing Rules", California Department of Motor Vehicles (DMV) Pressemitteilung, [http://www.dmv.ca.gov/pubs/newsrel/newsrel14/2014\\_34.htm](http://www.dmv.ca.gov/pubs/newsrel/newsrel14/2014_34.htm) (19. Mai 2014, abgerufen 28. Jun 2014)

Es besteht kein Zweifel, dass der Straßenverkehr bezüglich Verkehrs- und Transportleistung der für die Gesellschaft und die Volkswirtschaft bedeutendste Verkehrsträger ist. Der Ausbau der Infrastruktur an den Engpässen des Straßennetzes kann jedoch weder hinsichtlich der nachgefragten Kapazitäten noch bezüglich der erforderlichen Qualitäten mit den Anforderungen an eine verträgliche und umweltgerechte Realisierung Schritt halten. Vor dem Hintergrund begrenzter Budgets für den Aus- und Neubau von Verkehrsinfrastruktur werden lediglich Maßnahmen mit einem überproportionalen volkswirtschaftlichen Nutzen für eine Realisierung in Betracht gezogen. So werden z. B. in der Bundesverkehrswegeplanung Vorhaben erst dann vordringlich weiter verfolgt, wenn deren Nutzen die Kosten um das Dreifache übertreffen.

Neben den knappen Budgets sind die Randbedingungen des Städtebaus und der Raumordnung limitierende Faktoren für einen weiteren Ausbau der Verkehrsinfrastruktur. Für die im Zuge der zu beobachtenden Reurbanisierung steigenden Bevölkerungsdichten in den Städten ist ein proportional verlaufender Ausbau der Flächen für den ruhenden und fließenden Kraftfahrzeugverkehr weder darstellbar noch wünschenswert. Dies gilt in gleicher Weise für das hoch ausgelastete Fernstraßennetz, für das gerade in den Ballungsräumen mit den größten Kapazitätsdefiziten kaum noch Erweiterungsmöglichkeiten bestehen.

Vor diesem Hintergrund bleibt es weiterhin ein vorrangiges gesamtgesellschaftliches Ziel, die Mobilität von Personen und Gütern zu gewährleisten und zu verbessern, indem die Verkehrsleistung durch strukturelle Veränderungen reduziert (vermieden), die Verkehrsnachfrage auf verschiedene Verkehrsträger vernünftig aufgeteilt (verlagert) und die vorhandene Infrastruktur effizient genutzt wird.

Autonomes Fahren bietet neben der Perspektive einer besseren Teilhabe für heute wenig mobile Personengruppen die Aussicht auf eine deutlich verbesserte Nutzungsmöglichkeit der vorhandenen Infrastrukturen. In diesem Zusammenhang besteht zudem die Chance, Stadtraum, der heute dem Kraftfahrzeugverkehr gewidmet ist, für andere Nutzungen zurückzugewinnen.

Die Beiträge im Teil „Verkehr“ setzen sich aus verschiedenen Blickwinkeln mit diesen Perspektiven auseinander, bewerten deren Belastbarkeit und zeigen Möglichkeiten für die Einführung des autonomen Fahrens aus Sicht der Infrastruktur und des Verkehrsmanagements auf. Da die Verkehrssicherheit eine wesentliche Voraussetzung für die Einführung autonomen Fahrens darstellt, werden zudem die Chancen zur Erhöhung der Sicherheit sowie die mit autonomem Fahren verbundenen Sicherheitsrisiken beleuchtet.

Das Kapitel *Steuerung und Management in einem Verkehrssystem mit autonomen Fahrzeugen* von Peter Wagner stellt dar, wie gemischter, aus autonomen und normalen Fahrzeugen zusammengesetzter Verkehr in seiner Interaktion modelliert werden kann. Ziel der Modellierung ist es, auftretende systemische Effekte zu erkennen. Die auf der Grundlage dieser Modellierung durchgeführten Simulationen des motorisierten Straßenverkehrs einer Stadt erlauben eine Potenzialabschätzung für die verkehrlichen Wirkungen autonomen Fahrens im städtischen Kontext.

Im Kapitel *Verkehrliche Wirkungen autonomer Fahrzeuge* von Bernhard Friedrich wird aus der Verkehrsflusstheorie der Einfluss autonomer Fahrzeuge auf die Kapazitäten von freien Strecken im Zuge von Fernstraßen sowie von Knotenpunkten mit Lichtsignalanlagen abgeleitet. Auch wenn die Auswirkungen autonomer Fahrzeuge auf die Verbindungsqualitäten von Fahrten, die über unterschiedliche Infrastrukturelemente verlaufen, mit diesen Überlegungen noch nicht umfassend beschrieben werden können, liefern die Betrachtungen eine erste Einschätzung, welche Optimierungspotenziale für die Effizienz des Verkehrsablaufs mit autonomen Fahrzeugen verbunden sein könnten.

Die Metaanalyse *Erkenntnisse aus der Unfallforschung zum Sicherheitspotenzial automatisierter Fahrzeuge* von Thomas Winkle dokumentiert zunächst anhand bestehender Analysen der Unfallforschung Beispiele für das Potenzial durch sicherheitserhöhende Systeme mit geringeren Automatisierungsgraden. Belastbare Untersuchungen zu fahrerlosen Fahrzeugen mit seriennaher Funktionsausprägung fehlen dagegen heute noch. Für Prognosen verbleiben deshalb Abschätzungen des theoretischen Sicherheitspotenzials, die sich u. a. darauf stützen, dass über 90 Prozent der heutigen Verkehrsunfälle auf menschliches Versagen zurückzuführen sind. Vor diesem Hintergrund verspricht die Vision von flächendeckend fahrerlosen Fahrzeugen im Straßenverkehr einen gesellschaftlich erstrebenswerten Nutzen, selbst wenn die Technik fahrerloser Fahrzeuge keine absolute Perfektion erreichen wird.

Die Einsatzfelder autonomer Fahrzeuge im Bereich des Straßengütertransports werden im Kapitel *Autonome Fahrzeuge und autonomes Fahren im Bereich des Gütertransportes* von Heike Flämig skizziert. Ausgehend von einer Logistikkettenbetrachtung werden die sich durch ein autonomes Fahren ergebenden Veränderungen für Unternehmen und Gesellschaft sowie die notwendigen Umsetzungsvoraussetzungen kritisch reflektiert. Im Ergebnis ist damit zu rechnen, dass durch den Einsatz von fahrerlosen Fahrzeugen Chancen für die bessere Nutzung der Infrastruktur und die Optimierung logistischer Prozesse entstehen. Voraussetzung dafür wird aber die Reorganisation der Prozesse in vielen Supply Chains im gesamten logistischen System sein.

Vehicle-on-Demand-Systeme (VoD) sind die weitreichendste Anwendung autonomer Fahrzeuge. Die verkehrlichen Auswirkungen werden im Kapitel *Autonomous Mobility-on-*

*Demand Systems for Future Urban Mobility* von Marco Pavone beschrieben. Aus den Überlegungen wird deutlich, dass eine Neuorganisation des Stadtverkehrs mit VoD grundsätzlich möglich ist und viele Vorteile mit sich bringt. Durch die gemeinsame Nutzung sind bei VoD deutlich weniger Fahrzeuge für ein gleich gutes Mobilitätsangebot erforderlich. Die einfache Relokalisierung von autonomen Fahrzeugen ermöglicht ein der zeitabhängigen Nachfrage angepasstes Angebot und damit eine Vermeidung von Wartezeiten. Die Modellrechnungen zeigen, dass für ein gleichwertiges Taxiangebot in New York lediglich 70 Prozent der heute im Einsatz befindlichen Fahrzeuge erforderlich wären. Eine weitere Modellrechnung zeigt, dass in einer Stadt wie Singapur für eine vergleichbare Angebotsqualität lediglich ein Drittel der heute im Einsatz befindlichen Fahrzeuge benötigt werden würde.

Auch wenn verschiedene Fragestellungen zu den verkehrlichen Aspekten des autonomen Fahrens gerade im Hinblick auf den Mischverkehr mit normalen Fahrzeugen und insbesondere mit Fußgängern und Radfahrern noch nicht ausreichend beantwortet werden können, erwarten die einzelnen Beiträge eine wesentlich verbesserte Ausnutzung der vorhandenen Infrastruktur und eine Stabilisierung des Verkehrsablaufs. Damit verbunden sind vielfältige Chancen zur Verbesserung der Mobilität von Personen und Gütern und damit einhergehend eine Reduktion der Umweltbelastungen sowie die Rückgewinnung von öffentlichem Raum für urbanes Leben. Wesentlich für die erfolgreiche Einführung autonomer Fahrzeuge wird die Konzeption belastbarer Migrationspfade für die Entwicklung des Verkehrssystems unter Berücksichtigung der Infrastruktur sein. In diesen Pfaden muss die zunehmende Automatisierung wie auch die zunehmende Durchdringung des Gesamtsystems flexibel abgebildet werden können. Entsprechende Konzepte werden geprägt sein von der Widmung von Flächen für autonomen, normalen und gemischten Verkehr und von spezifischen Regeln für die Geschwindigkeit, um in allen Fällen eine hohe Verkehrssicherheit zu gewährleisten.

Peter Wagner

## Inhaltsverzeichnis

<b>15.1 Einleitung</b> .....	314
<b>15.2 Ein Modell des Fahrens</b> .....	315
<b>15.3 Mensch versus Maschine</b> .....	319
<b>15.4 Anfahren an einer Lichtsignalanlage (LSA)</b> .....	322
<b>15.5 Adaptive Lichtsignalanlage</b> .....	324
<b>15.6 Grüne Welle mit autonomen Fahrzeugen</b> .....	325
<b>15.7 Simulation einer Stadt</b> .....	326
<b>15.8 Fazit</b> .....	328
<b>Literatur</b> .....	329

---

P. Wagner (✉)  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Verkehrssystemtechnik,  
Deutschland  
Peter.wagner@dlr.de



## 15.1 Einleitung

Dieser Beitrag hat zum Ziel, die Auswirkungen des autonomen Fahrens auf der Ebene des Verkehrsmanagements zu quantifizieren. Dazu wird eine Modellierung des autonomen Fahrens entwickelt, die es ermöglicht, von Menschen geführte und autonome Fahrzeuge mit nur geringen Modifikationen zu verwenden. Das ist wichtig, wenn es darum geht, wie die Instrumente des Verkehrsmanagements weiterentwickelt sind, um autonome Fahrzeuge im Verkehrssystem berücksichtigen zu können. Interessant ist in diesem Zusammenhang vor allem der sogenannte gemischte Verkehr, bei dem normale und autonom fahrende Fahrzeuge miteinander agieren. Das dürfte – auch nach der Markteinführung autonomer Fahrzeuge – noch lange der Normalzustand auf den Straßen sein; von daher ist es von großer praktischer Bedeutung, genau diesen Zustand gut zu verstehen, um eventuell auftretende systemische Effekte im Voraus zu erkennen und diesen entgegenwirken zu können.

Da es bislang autonome Fahrzeuge noch nicht gibt, sind Teile der folgenden Betrachtungen und Szenarien sicher spekulativ. Allerdings ist auch die Modellierung des humanen Fahrers noch bei Weitem nicht abgeschlossen, sodass in diesem Beitrag der Schwerpunkt auf einer konsistenten Modellierung liegen wird. Zielrichtung der hier vorgestellten Modellierung ist es, von Menschen geführte und autonome Fahrzeuge möglichst mit dem gleichen Modell zu beschreiben, bei dem sich nur die Parametrierungen unterscheiden. Ein gutes Beispiel dafür ist der einzuhaltende Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug, ausgedrückt durch die Zeitlücke: Ein autonomes Fahrzeug kann hier Werte von 0,3...0,5 s [1] erreichen, von Menschen geführte Fahrzeuge dürfen nach dem Gesetz 0,9 s nicht unterschreiten (in Deutschland). Die entsprechende gesetzliche Empfehlung liegt sogar bei 2,0 s, ein Wert, der aber nur in Zeiten schwacher Verkehrsnachfrage eingehalten wird. Im dichten Verkehr wird dieser Wert zum Teil deutlich unterschritten, als häufigster Wert auf einer dicht befahrenen Autobahn werden 1,1 s erreicht (s. Abb. 15.3), bei einem Durchschnittswert von 1,4 s. Würden die Fahrer sich an die gesetzlichen Vorgaben halten, dann würde der Verkehr auf vielen Straßen sehr viel früher zum Erliegen kommen als derzeit.

Dieser Beitrag ergänzt Kap. 16 und Kap. 19 in diesem Buch. Während Kap. 16 ganz allgemein die verkehrliche Wirkung autonomer Fahrzeuge beschreibt, geht es in diesem Beitrag neben der Modellierung dieser und von Menschen gefahrener Fahrzeuge um Effekte autonomer Fahrzeuge auf das Verkehrsmanagement. Kapitel 19 hingegen ignoriert Fragen des Verkehrsablaufes und der Verkehrssteuerung weitgehend und betrachtet vor allem eine optimale Allokation von Angebot zur Nachfrage unter der Voraussetzung, dass Fahrzeuge geteilt werden können. Ganz richtig kann man an dieser Stelle festhalten, dass eine Kombination dieser Ansätze, zusammen mit einer korrekten Beschreibung des Anteils von Reisenden, die sich von einem robotischen *Mobility-on-demand*-System transportieren lassen, die bestmögliche Abschätzung des Potenzials autonomer Fahrzeuge ermöglichen würde.

Ebenfalls nicht betrachtet werden hier Effekte, die aus einer grundlegend anderen Organisation des Verkehrs resultieren. Beispielhaft sei hier nur das EU-Projekt CityMobil genannt, in dem solche Szenarien diskutiert und näher untersucht wurden [2].

In diesem Beitrag wird an einigen wenigen Beispielen, die nicht vollständig spezifiziert sind, der Frage nachgegangen, wie sich autonome Fahrzeuge auf typische Verkehrsmanagementanwendungen auswirken. Das sind, nach aufsteigender Komplexität geordnet, die Simulation einer einzelnen Lichtsignalanlage (Abschn. 15.4), die Simulation einer Kreuzung, die von einer adaptiven Lichtsignalanlage gesteuert wird (Abschn. 15.5), die Simulation einer grünen Welle (Abschn. 15.6) und die Simulation einer ganzen Stadt (Abschn. 15.7).

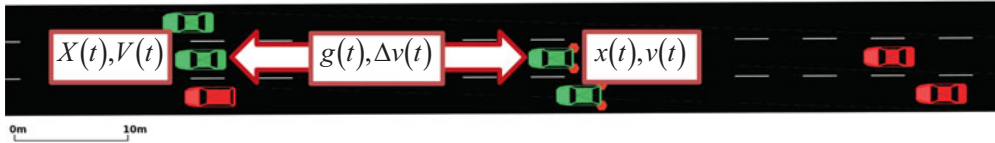
Ein Teil der hier zu betrachtenden Fragestellungen kann auf Ergebnisse zurückgreifen, die das Einführen einer intelligenten Abstandsregelung (autonomous intelligent speed control – AIC) auf den Verkehrsablauf vor allem auf Autobahnen hat [3]. Zu diesem Bereich gibt es umfangreiche Literatur, die Dissertation von Kersting [3] und Teile des Buches von Winner et al. [12] geben hier mehr Überblick als in diesem Kapitel möglich ist.

Ein solches AIC-Szenario hat starke Ähnlichkeit zu Use-Case 1 „Interstate Pilot with Availability through Driver“, und das ist wiederum (aus Sicht des Verkehrsablaufes) ein Spezialfall von Use-Case 3 „Full Automation with Availability through Driver“ (s. Kap. 2 für die Definition der Use-Cases). Das ist auch der Use-Case, der in diesem Kapitel die wichtigste Rolle spielt – wobei es aus Sicht des Verkehrsflusses ziemlich gleichgültig ist, ob der Fahrer verfügbar ist oder nicht. Die Verfügbarkeit des Fahrers könnte wichtig sein, wenn der Einfluss von Ausfällen auf den Verkehrsfluss untersucht wird, dieses Thema wird allerdings in diesem Buch nicht aufgegriffen. Es würde eine detaillierte Statistik voraussetzen, wie häufig so etwas passiert und unter welchen Randbedingungen – eine Information, die beim derzeitigen Stand der Technik autonomer Fahrzeuge nicht verfügbar ist. Die Use-Cases 2 (Valet-Parken) und 4 (Vehicle-on-Demand) spielen in diesem Abschnitt eine untergeordnete Rolle, der Use-Case 4 ist aus Verkehrsflusssicht allerdings wie Use-Case 3 zu behandeln. Use-Case 2 wäre interessant, weil er Einfluss hat auf den sogenannten Parksuchverkehr und damit indirekt auf die Verkehrsnachfrage und somit auch die Verkehrssteuerung beeinflusst, würde aber auf der Ebene des Verkehrsmanagements eine deutlich kompliziertere Vorgehensweise voraussetzen als hier geleistet werden kann – so bräuhete es eine präzise Quantifizierung des Parksuchverkehrs in einer Stadt. Auch die in Abschn. 15.7 beschriebene Simulation der Stadt Braunschweig geht davon aus, dass Fahrzeuge, die ihr Ziel erreicht haben, immer und sofort einen Parkplatz finden.

---

## 15.2 Ein Modell des Fahrens

Modelle, die beschreiben, wie ein Mensch ein Fahrzeug führt, gibt es schon sehr lange [4]. Sehr viele dieser Modelle (für einen Überblick s. [5], [6], [7], [8]) – seit 1950 sind wohl mehr als 100 Modelle allein für den Prozess des Folgens eines vorausfahrenden Fahrzeuges beschrieben worden – lassen sich ohne Weiteres auch als Modelle für ein autonomes Fahrzeug verstehen – wie bereits in Abschn. 15.1 begründet, mit verschiedenen Parametrierungen für Mensch bzw. Maschine. Damit wird es konzeptionell recht einfach, auch gemischten Verkehr zu modellieren und die Auswirkungen auf das gesamte Verkehrssystem zu quantifizieren.



**Abb. 15.1** Visualisierung der verwendeten dynamischen Größen anhand eines SUMO [17]-Screenshots. Fahrrichtung ist von rechts nach links

Im Folgenden liegt der Fokus auf dem Prozess des Fahrzeugfolgens, welches den wichtigsten, aber nicht den einzigen relevanten Prozess darstellt, der darüber bestimmt, wie sich der Verkehrsablauf auf Straßen entwickelt.

Jedes Fahrzeug wird dabei beschrieben durch seine Position  $x(t)$ , die von der Zeit  $t$  abhängt und in Bezug auf eine Referenz (z. B. Anfang des aktuellen Straßenabschnitts) definiert ist, durch seine Geschwindigkeit  $v(t)$  und seine Beschleunigung  $a(t)$  (s. Abb. 15.1). Bei Mehrspurverkehr kommt noch die Spur hinzu, auf der das Fahrzeug sich befindet, oder die sogenannte Lateralkoordinate, also der Abstand des Fahrzeugs vom Fahrbahnrand. Genau genommen müsste auch noch eine Indizierung jedes Fahrzeugs eingeführt werden, was im Folgenden durch die Beschreibung des vorausfahrenden Fahrzeugs mit großen Buchstaben  $X(t), V(t), A(t)$  umgangen wird. Mit den zusätzlichen Variablen Abstand  $g(t) = X(t) - x(t) - \ell$  und Geschwindigkeitsdifferenz  $\Delta v(t)$  (s. Abb. 15.1) kann dann die Reaktion des Folgefahrzeugs definiert werden als die Beschleunigung, die das Fahrzeug in einer gegebenen Situation appliziert:

$$a = \frac{d}{dt}v = \dot{v} = f(v, g, \Delta v) \quad (15.1)$$

Diese abstrakte Gleichung (15.1) ließe sich noch weiter abstrahieren, z. B. fehlt hier ein Modell für Fahrerfehler und für Fluktuationen ebenso wie die Modellierung einer Reaktionszeit. Ein entsprechendes Fehlermodell wird im Abschn. 15.3 vorgestellt, die Reaktionszeit bleibt ganz außen vor, weil sie ein enorm schwieriges Konstrukt ist: In Messdaten zeigt sich zwar sehr oft, dass die Beschleunigung eines Folgefahrzeugs rund zwei Sekunden der Beschleunigung des vorausfahrenden Fahrzeugs hinterherhinkt, es gibt aber auch Fälle, in denen das Folgefahrzeug rund eine Sekunde vor dem Führungsfahrzeug zu bremsen beginnt – z. B. bei der Annäherung an eine Lichtsignalanlage (Ampel). Im Folgenden soll die abstrakte Gleichung (15.1) genauer spezifiziert werden. Beispielsweise ist es eine wichtige Frage für die folgenden Betrachtungen, wie genau ein autonomes Fahrzeug sich bewegt. Überraschenderweise funktionieren viele der aktuellen adaptiven Abstandsregler und auch veröffentlichte Steuerungsalgorithmen für automatische Fahrzeuge [9], [10], [11] als linearer Regler:

$$\dot{v} = \alpha(g - g^*(v)) + \beta\Delta v \quad (15.2)$$

Typische Parameter für die beiden Zeitkonstanten sind dabei durch  $\alpha = 1/20 \text{ 1/s}^2$  und  $\beta = 1/1,5 \text{ 1/s}$  gegeben; bei diesen Werten sind solche Regler so eingestellt, dass sie von Fahrern als angenehm und natürlich empfunden werden [12]. Für den bevorzugten Abstand  $g^*(v) = v\tau$  wird im Wesentlichen die gesetzliche Regel übernommen, wenn auch mit einem etwas kleineren Wert der bevorzugten Zeitlücke  $\tau$ , z.B.  $\tau = 1,5 \text{ s}$ , der auch im Folgenden verwendet wird. Das Modell in Gleichung (15.2) wurde ursprünglich von Helly 1959 [13] als ein Modell eingeführt, das einen menschlichen Fahrer beschreiben soll. Das unterstreicht die Behauptung, dass viele Fahrermodelle und die Modelle für das autonome Fahren mathematisch sehr ähnlich sind. Worin sie sich unterscheiden, wird versucht in Abschn. 15.3 zu spezifizieren.

Das Modell in Gleichung (15.2) hat Grenzen. Beispielsweise ist es nur für bestimmte Parameter  $(\alpha, \beta)$  sicher und auch nur für eine kleine Auswahl von Parametern kolonnenstabil. Unter Kolonnenstabilität wird verstanden, dass auch eine Kette von mehreren Fahrzeugen, die hintereinander herfahren, nicht anfängt sich aufzuschaukeln: Aus kleinen Störungen, z. B. ein schwaches Bremsen des ersten Fahrzeugs wird entlang der Kette ein immer stärkeres, das im Extremfall bis zum Stillstand eines der Fahrzeuge in der Kette führen kann. Oder auch zu einem Verkehrsunfall. Dieses Verhalten ist bislang nur in sehr speziellen Situationen gefunden worden (s. z. B. [19]), es scheint nicht der Normalfall zu sein.

Allerdings werden die Parameter mit Kolonnenstabilität von menschlichen Fahrern als nicht sehr angenehm empfunden, weshalb AIC-Regler hier meistens einen Kompromiss eingehen, der zu einer schwachen Kolonneninstabilität führt [12].

Daher wird hier ein anderer Ansatz betrachtet, der in der Tradition der Modelle in [14], [15], [16] steht. In einem ersten Schritt wird überlegt, dass eine wichtige Bedingung für sicheres Fahren erfüllt ist, wenn Folgendes gilt:

$$d(v) + v\tau \leq D(V) + g.$$

In dieser Gleichung sind  $D(V), d(v)$  die Bremswege des führenden und des folgenden Fahrzeugs. Offensichtlich setzt dieses Modell voraus, dass der Folgefahrer eine Vorstellung davon hat, ob und wie das Führungsfahrzeug fahren bzw. bremsen wird. Das ist sicherlich nicht vollständig korrekt, dennoch funktioniert Fahren in vielen Fällen unter der Annahme, dass die anderen Fahrer sich so ähnlich verhalten wie man selbst.

Allerdings bedeutet das auch, dass sich der aus dieser und der folgenden Gleichung resultierende Ansatz durch ein „merkwürdiges“ Verhalten des Führungsfahrzeuges austricksen lässt. Verfügt das Führungsfahrzeug z. B. über ein Notbremsssystem, das Verzögerungen bis zu  $12 \text{ m/s}^2$  erlaubt, dann verletzt es die Annahme, dass es sich so ähnlich verhält wie das Folgefahrzeug – typische Verzögerungswerte menschlicher Fahrer liegen im Bereich bis maximal  $4 \text{ m/s}^2$  –, und weist damit einen viel kürzeren Bremsweg auf. Ein wenig lässt sich das noch ausgleichen, wie auch die folgenden Simulationsergebnisse zeigen, weil die aus diesem Ansatz resultierenden Gleichungen bei starkem Bremsen des Führungsfahrzeugs im Extremfall ihre eigene Bremsverzögerung überschreiten können. Andererseits ist

dieser Ansatz auch einer, den man für die Entwicklung von Fahrermodellen für die Verkehrssicherheit weiter treiben könnte.

Das obige Modell lässt sich weiterentwickeln, indem verlangt wird, dass die Sicherheitsbedingung nicht nur zur aktuellen Zeit  $t$  erfüllt sein soll, sondern auch noch eine gewisse Zeit  $t + T$  in der Zukunft. Die Zeit  $T$  ist dabei die Antizipationszeit, also die Länge des Planungshorizonts des Fahrers. Bezeichnet die Notation  $x$  den Wert der Variablen  $x$  zur Zeit  $t + T$ , wird aus der Sicherheitsgleichung:

$$d(v') + v'\tau \leq D(V') + g'.$$

Diese Gleichung kann aber nun nach der Beschleunigung  $a$  umgestellt werden. So ist  $x' = x + vT + aT^2 / 2$ , und zusammen mit einem Ansatz für die Bremswege  $d(v) = v^2 / (2b)$  lässt sich dann die Sicherheitsgleichung nach  $a$  auflösen. Dafür gibt es verschiedene Ansätze, hier wird vor allem der exakte Ansatz verfolgt:

$$\dot{v} = \frac{1}{T} \left( -b(\tau + T/2) + \sqrt{b^2(\tau + T)^2 + V^2 + 2bvT + 2b(g + \Delta vT)} - v \right). \quad (15.3)$$

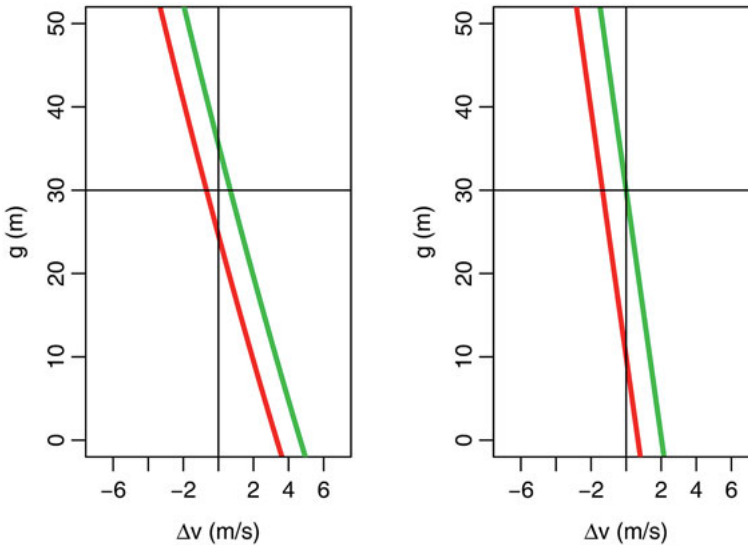
Interessanterweise führt dieser Ansatz für  $T \rightarrow 0$  auf den in SUMO [17] verwendeten zurück.

Eine andere Möglichkeit, [15] folgend, ist eine Taylor-Entwicklung von  $d(v') = d(v + aT) \approx d(v) + aTv / b(v)$ , was interessanterweise auf eine lineare Gleichung für  $a$  führt, die einfacher zu lösen und numerisch weniger komplex ist:

$$a = \frac{V^2 - v^2 + 2b(T\Delta v + g - v\tau)}{T(2b\tau + bT + 2v)}.$$

Obwohl diese Gleichungen kompliziert aussehen und es einigermaßen unwahrscheinlich ist, dass Menschen tatsächlich eine Wurzel aus einem komplizierten Ausdruck ziehen können, sieht sie grafisch dem Helly-Modell doch sehr ähnlich. Das ist deshalb interessant, weil es sich in der Tat gut vorstellen lässt, dass ein menschlicher Fahrer in der Lage ist, eine lineare Abwägung etwa nach dem Motto „Ich bin etwas schneller als der vor mir, aber der Abstand ist groß, daher muss ich gegenwärtig nichts ändern“ durchführt. Eine Vorstellung, wie diese Beschleunigungsfunktion für realistisch gewählte Parameter aussieht, vermittelt Abb. 15.2.

In diesem Zusammenhang ist es noch interessant zu wissen, ob dieser Ansatz tatsächlich zusammenstoßfrei ist. Die simple Antwort lautet: nein. Unter bestimmten Bedingungen lässt sich die Dynamik, die aus Gleichung (15.3) folgt, in der Tat austricksen. Das sei an einer Kette von Fahrzeugen demonstriert, die einem Führungsfahrer folgen, das nach einem bestimmten Protokoll  $a_0(t)$  fährt. Dabei lassen sich als wesentliche Parameter in der Dynamik des Führungsfahrers vor allem die maximalen Beschleunigungen parametrieren. Von besonderem Interesse sind dabei die maximalen Bremsverzögerungen und die Frage, ob man bei dem Modell einen Zusammenstoß produzieren kann.



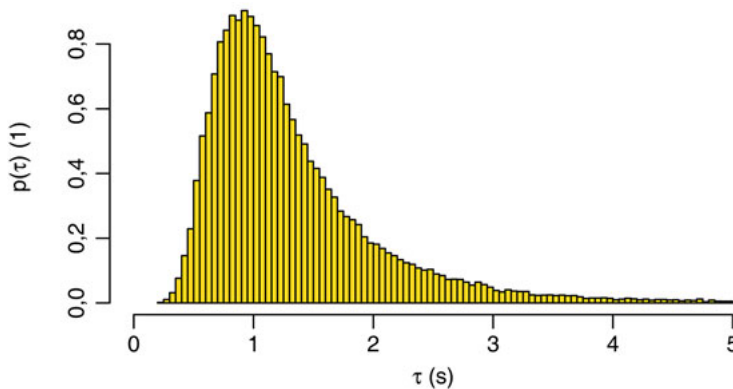
**Abb. 15.2** Darstellung der Beschleunigungsfunktionen. Statt hier die gesamte Funktion zu zeichnen, wird nur der durch zwei Linien begrenzte Bereich im  $(\Delta v, g)$ -Raum dargestellt, in dem die Beschleunigung beider Modelle klein ist. Links von den Linien bremsst das Fahrzeug, rechts davon beschleunigt es. Die linke Abbildung ist das Modell von Gleichung (15.3), die rechte das Helly-Modell (15.2). Die gewählten Parameter sind  $V = 20$ ,  $\tau = 1,5$ ,  $b = 4$ ,  $T = 2$

Natürlich kann kein Verfahren wirklich alle Möglichkeiten durchtesten. Das folgende Vorgehen ermöglicht aber zumindest eine Abschätzung, wie sicher die Modelle sind. Dazu folgen in einer Simulation  $n = 50$  Fahrzeuge einem Führungsfahrzeug, das nach einem bestimmten Protokoll seine Beschleunigung wählt. Unter anderem verzögert es immer wieder bis zum Stillstand, zum Teil auch mit Bremsverzögerungen, die an der Grenze der derzeitigen fahrdynamischen Möglichkeiten sind. Aus Untersuchungen zu diesem Thema ergab sich sehr schnell, dass die Modelle nur dann ohne Unfall auskommen, wenn die Antizipationszeit  $T$  beim Bremsen auf einen kleineren Wert gesetzt wird. Im Folgenden werden die Modelle immer mit  $T = 2$  s beim normalen Fahren und mit  $T = 0,5$  s beim Bremsen betrieben.

Aus den entsprechenden Simulationen geht dann hervor, dass unter diesen Randbedingungen keine Unfälle mit dem Modell in Gleichung (15.3) auftreten, jedenfalls nicht mit dem gewählten Protokoll  $a_0(t)$ . Das Helly-Modell ist allerdings mit den gewählten Parametern nicht so tolerant und produziert gelegentlich Auffahrunfälle.

## 15.3 Mensch versus Maschine

An diesem Punkt stellt sich die Frage, was denn eigentlich einen menschlichen Fahrer von einem autonomen Fahrzeug unterscheidet. Bislang ist nur ein wesentlicher Unterschied zu

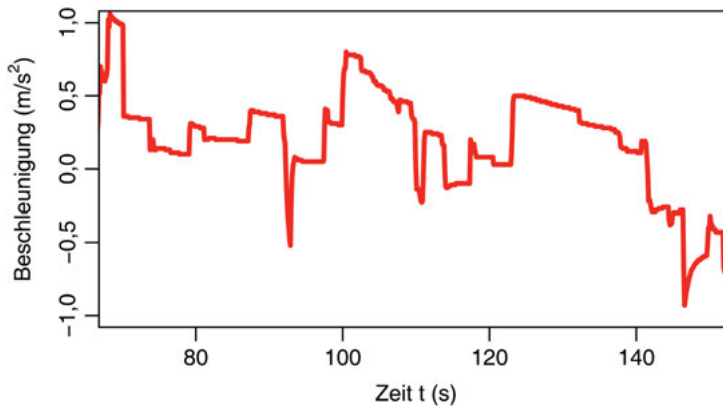


**Abb. 15.3** Abstandsverteilung auf der linken Spur der A3. Dargestellt ist die Dichte der jeweiligen Zeitlücke. Ziemlich genau bei 1,1 s liegt das Maximum der Funktion, während der Mittelwert bei 1,4 s liegt. Es werden zum Teil gefährlich kurze Zeitlücken beobachtet

erkennen, und das ist die Zeitlücke  $\tau$ , mit der die beiden fahren. Menschen sollten nicht mit weniger als  $\tau = 0,9$  s Abstand fahren, die gesetzliche Empfehlung ist sogar  $\tau = 2$  s, eine Maschine kann im Prinzip mit  $\tau = 0,3 \dots 0,5$  s Abstand fahren [1]. Eine beispielhafte Auswertung der tatsächlich gefahrenen Abstände (s. Abb. 15.3) auf einer deutschen Autobahn zeigt (im Bereich um 100 km/h, wo die größten Verkehrsstärken erreicht werden), dass einige (wenige) menschliche Fahrer diesem „Ideal“ nahe kommen, die überwältigende Mehrheit zeigt aber ein gesetzkonformes Verhalten.

Abb. 15.3 demonstriert auch, dass das menschliche Verhalten eine beträchtliche Bandbreite aufweist [18], was im Gegensatz zu autonomen Fahrzeugen steht: Diese würden alle mit einem kleinen und sehr ähnlichem Wert von  $\tau$  fahren. Diese Bandbreite lässt sich detaillierter charakterisieren [17] und quantifizieren. Im Wesentlichen kann gesagt werden, dass  $\tau$  nicht nur zwischen verschiedenen Fahrern unterschiedlich ist, sondern sogar bei ein und demselben Fahrer nicht konstant bleibt. Leider ist  $\tau$  nicht präzise beobachtbar, vor allem dann nicht, wenn das Führungsfahrzeug selbst die Geschwindigkeit permanent verändert, von daher können an dieser Stelle nur Vermutungen angestellt werden, wie sich  $\tau$  im Zeitverlauf verändert. Das führt dann auf sogenannte 2-D-Modelle [17], [19], bei denen  $\tau$  in jedem Zeitschritt variiert. Eine einfache Vorstellung, die auf eine solche Dynamik führt, ist, dass der Fahrer bei der Bestimmung des Abstandes einen Fehler macht. Allerdings ist dieser Fehler zeitlich korreliert, d. h. wenn zu einem Zeitpunkt der geschätzte Abstand kleiner ist als der wahre Abstand, so wird das auch noch eine gewisse Zeit danach der Fall sein. Und, mit einiger Wahrscheinlichkeit, ist der Fehler asymmetrisch: Abstände werden oft deutlich kürzer abgeschätzt als sie tatsächlich sind. Jedenfalls führt ein solcher Modellierungsansatz auf eine sehr breite Verteilung von  $\tau$ -Werten, genau wie empirisch beobachtet.

Ein zweiter Punkt, der einen Mensch von einer Maschine unterscheidet, ist der sogenannte Aktionspunktmechanismus [20]. Genau genommen lässt sich ein menschlicher



**Abb. 15.4** Beschleunigung als Funktion der Zeit bei einem menschlichen Fahrer. Es ist zu sehen, dass sich die Beschleunigung an den sogenannten Aktionspunkten sprunghaft ändert. Zwischen den Aktionspunkten bleibt sie näherungsweise konstant. Die Daten sind bei einer „Fahrt“ des Autors mit einem Fahr Simulator aufgenommen worden, ähnliche Bilder finden sich in allen Datensätzen mit einer ausreichend guten Messung der Beschleunigung oder der Stellung von Gas- und Bremspedal

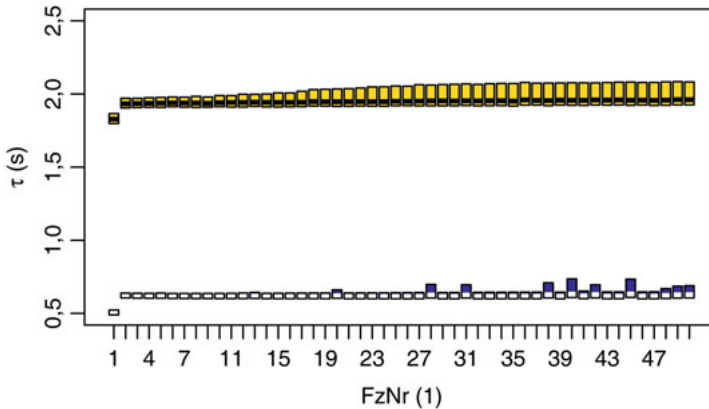
Fahrer nicht durch eine Differenzialgleichung (15.1) beschreiben. Vielmehr erfolgt die Kontrolle eines Fahrzeugs durch Korrektur der Beschleunigung (Gaspedalstellung) in unregelmäßigen Zeitabständen, ein Beispiel dafür zeigt Abb. 15.4.

Die zeitlichen Abstände zwischen aufeinanderfolgenden Aktionspunkten folgen ebenfalls einer sehr breiten Verteilung mit Werten zwischen 0,5 und 1,5 s. Offensichtlich ist hier ein weiterer Modellierungsansatz für Verkehrssicherheitsfragen – wenn die Zeit zwischen zwei Aktionspunkten sehr lang wird, dann kann es zu einer kritischen Situation kommen. Im Normalfall passiert das aber nicht, und dann gibt es nur geringe Unterschiede zwischen einer Modellierung nach Gleichung (15.1) und einer Modellierung, in der die Aktionspunkte explizit verwendet werden [21]. Insbesondere führt der Aktionspunktmechanismus allein nicht zu einer breiten Verteilung von Abständen zwischen den Fahrzeugen.

Auch dieses sei wieder am Beispiel der in Abschn. 15.2 benutzten Kette von Fahrzeugen demonstriert, die einem Führungsfahrzeug folgen. Eine Auswertung des (in der Simulation) gemessenen Abstandes, hier als Funktion der Nummer des Folgefahrzeuges, zeigt, dass ein autonomes Fahrzeug in den meisten Fällen mit deutlich geringerer Varianz dem Führungsfahrzeug folgt – trotz dessen zum Teil sehr volatilen Verhaltens. Eine Darstellung dazu findet sich in Abb. 15.5.

Somit sind die in diesem Kapitel verwendeten Modelle spezifiziert, und der Unterschied zwischen der menschlichen und der autonomen Fahrweise ist charakterisiert. Im Folgenden wird anhand einiger Anwendungen demonstriert, was das für typische Verkehrsmanagementanwendungen bedeutet.





**Abb. 15.5** Abstandsverhalten für menschliche und autonome Fahrzeuge. Dargestellt ist der Median des Abstands und die 25 Prozent- und 75 Prozent-Perzentile, jeweils als Funktion der Position in der Kette. Die obere Kurve zeigt das Modell des menschlichen Fahrers, die untere modelliert eine Kette von autonomen Fahrzeugen

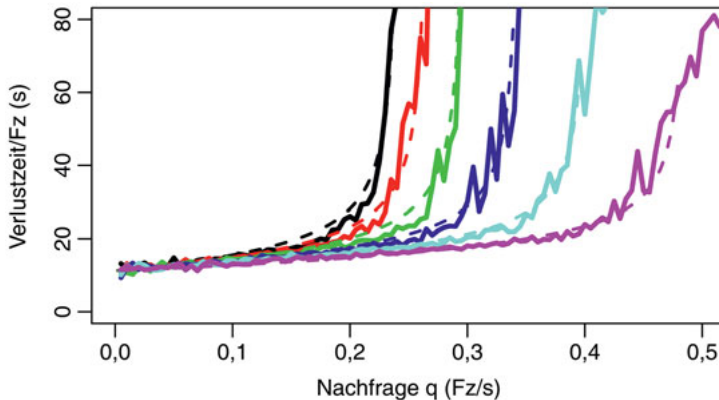
## 15.4 Anfahren an einer Lichtsignalanlage (LSA)

Dieser Prozess ist eine der Situationen, bei dem autonome Fahrzeuge erhebliche Gewinne versprechen. An einem Zufluss einer LSA wird im Folgenden die Verlustzeit pro Fahrzeug für eine beliebige Kombination aus normalen und autonomen Fahrzeugen untersucht. Dabei bezeichnet  $\eta$  den Anteil autonom fahrender Fahrzeuge, mit der Annahme  $\tau = 0,5$  s für autonome und  $\tau = 1,5$  s für normale Fahrzeuge. Die Simulationsergebnisse werden darüber hinaus durch eine theoretische Betrachtung gestützt. Für die beschriebene Situation gibt es eine solche Theorie, die in [22] entwickelt wurde. Interessanterweise lässt sie sich auf eine Situation mit einem Mix aus autonomen und normalen Fahrzeugen übertragen. Dann lautet der entsprechende Ausdruck:

$$d(q,\eta) = \frac{c(1-\lambda)^2}{2(1-y)} + \frac{1}{2} \frac{x^2}{q(1-x)}, \quad \lambda = \frac{g}{c}, y = \frac{q}{s}, x = \frac{y}{\lambda}, s = s_0(1-\eta) + s_1\eta \quad (15.4)$$

In Gleichung (15.4) ist  $q$  die Nachfrage,  $s_0$  die Kapazität eines Stroms von Menschen gesteuerter Fahrzeuge,  $s_1$  die Kapazität eines Stroms automatisierter Fahrzeuge,  $g$  die Freigabezeit (Grünzeit) und  $c$  die Umlaufzeit der Anlage. Die Umlaufzeit ist die Zeit, die vergeht, bis die Anlage wieder den Anfangszustand erreicht hat. Die Simulationsergebnisse für ausgewählte Variationen der Nachfrage  $q$  und des Anteils autonomer Fahrzeuge  $\eta$  ist in Abb. 15.6 dargestellt.

Die Kurven in Abb. 15.6 wurden aufgenommen, indem verschiedene Werte der Nachfrage  $q$  (variierend von 18 Fz/h bis 1800 Fz/h) für jeweils 5 Stunden simuliert wurden. Die Nachfrage selbst ist eine stochastische Größe (näherungsweise Poisson-verteilt), d. h., in jedem betrachteten Zeitintervall kommt immer eine andere Anzahl von Fahrzeugen an,



**Abb. 15.6** Verlustzeit an einer LSA als Funktion der Nachfrage und für verschiedene Ausstattungsgraden  $\eta = 0, 20\%, 40\%, 60\%, 80\%$  und  $100\%$  (von links nach rechts). Die gestrichelten Linien sind aus Gleichung (15.4) berechnet, allerdings mit einer Kapazität  $s$ , die direkt in der Simulation gemessen wurde

nur der Mittelwert über viele solcher Zeitintervalle ergibt dann die korrekte (gesetzte) Nachfrage.

Für jedes simulierte Fahrzeug wurde die Verlustzeit aufgezeichnet und aus diesen Verlustzeiten der in Abb. 15.6 eingetragene Mittelwert ausgerechnet. Im Prinzip kann die ganze Verteilung der Verlustzeiten zur Charakterisierung der Ergebnisse herangezogen werden, was aus Platzgründen unterbleibt, obwohl es interessant wäre: Die Schwankungen der Verlustzeiten sind ein Maß für die Verlässlichkeit eines solchen Systems. Allerdings erweist sich in dem betrachteten Beispiel, dass die Schwankungen der Verlustzeit nur sehr schwach vom Anteil der autonom fahrenden Fahrzeuge abhängt, die wesentliche Quelle von Stochastizität in diesem System wird von der Nachfrage generiert und nicht von der Dynamik der Fahrzeuge.

Zwei Ergebnisse fallen in Abb. 15.6 auf. Zum einen stimmt die Beschreibung durch die Theorie nicht immer mit den Simulationsergebnissen überein. Hier steckt noch einiges an Forschungsbedarf, weil es gar nicht so einfach ist, die in der Theorie vorausgesetzten Annahmen in die simulative Realität zu übertragen. Das wird sicherlich beim Vergleich mit realen Messwerten noch einmal schwieriger. Für die erzielte Übereinstimmung mussten darüber hinaus aus der Simulation ermittelte Werte für die Sättigungsverkehrsstärke verwendet werden – mit den theoretischen Werten, also den  $\tau$ -Werten wie in Abschn. 15.3 definiert, ist die Übereinstimmung nicht überzeugend.

Zum anderen verändert sich durch die autonomen Fahrzeuge „nur“ die Kapazität, ansonsten gibt es keine weiteren oder nur sehr geringe Gewinne. Solange die Nachfrage von der jeweiligen Kapazität entfernt ist, gibt es auch nur geringe Unterschiede zwischen den verschiedenen Szenarien, zumindest nicht auf der Ebene der hier gewählten Beschreibung.

Eine Änderung der Kapazität hat allerdings einen sehr positiven Effekt: Es bedeutet, dass die notwendigen Freigabezeiten an einer LSA kürzer werden können und damit mehr Zeit für andere Verkehrsträger zur Verfügung steht.

## 15.5 Adaptive Lichtsignalanlage

In Abschn. 15.4 wurde eine Lichtsignalanlage betrachtet, die in Festzeitsteuerung läuft. Viele moderne Anlagen laufen allerdings mit einer adaptiven Steuerung. Das bedeutet, dass die LSA versucht, ihre Freigabezeiten nach der aktuellen Nachfrage einzurichten. Bei kleiner Nachfrage resultieren daraus kurze Freigabezeiten, bei großer Nachfrage reagiert die Anlage mit langen Freigabezeiten. Die Details sind etwas komplizierter, weil die Verlustzeit als Funktion der Nachfrage betrachtet ein Minimum bei einer bestimmten optimalen Umlaufzeit hat. Eine adaptive Anlage ist in der Lage, sich die optimale Umlaufzeit selbst auszusuchen, darüber hinaus nutzt sie auf sehr geschickte Weise die Schwankungen aus, die in einem Verkehrsstrom vorkommen.

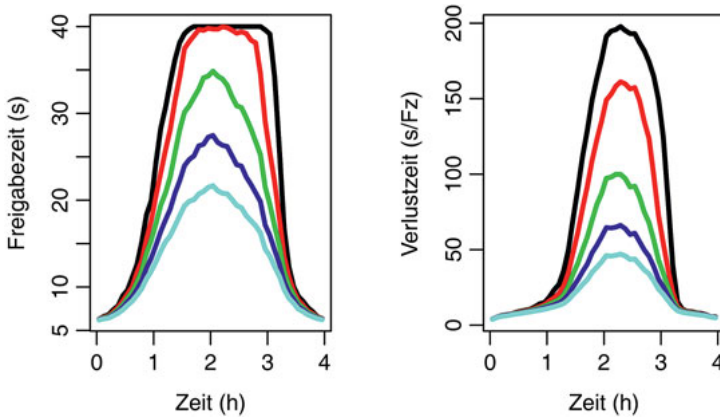
Auch in diesem Fall soll untersucht werden, wie eine solche adaptive Anlage mit einem Gemisch aus autonomen und normalen Fahrzeugen umgeht. Zu diesem Zweck wurde die Simulation einer zweiarmigen Kreuzung aufgesetzt, die mit einem adaptiven Verfahren gesteuert wird [25]. Die beiden Arme sind 600 m lang, gemessen wird wieder die Verlustzeit pro Fahrzeug an dieser Kreuzung. Im Unterschied zu Abschn. 15.4 wurde jetzt aber eine Nachfrage gewählt, die von der Zeit abhängt und damit eine typische Spitzenstundengruppe nachbildet, bei der zur Zeit des Nachfragemaximums die Anlage trotz ihrer Adaptivität gesättigt ist. Die hier gewählte Nachfragefunktion lautet:

$$q(t) = q_0 + q_1 \sin\left(\frac{\pi t}{T}\right),$$

wobei  $q_0$  eine Grundlast ist,  $q_1$  die Amplitude der Nachfrageschwankung und  $T$  die gesamte Zeitdauer der Simulation. Beide Arme werden mit der gleichen Nachfrage belastet, was einen relativ ungünstigen Fall darstellt.

Neben den Verlustzeiten sind in diesem Fall vor allem die Freigabezeiten von Interesse. Da die Anlage diese Zeiten der Nachfrage anpasst, schwanken diese innerhalb typischer Grenzen. In vielen Ländern kann die Freigabezeit nicht beliebig schwanken: So kann die Freigabezeit bei einer normalen Lichtsignalanlage nicht unter 5 s sinken, und in den folgenden Simulationen ist die maximale Freigabezeit auf 40 s gesetzt.

Eine solche Simulation ist auch ein interessanter Fall bei der Auswertung der Simulationsdaten. Eine einzelne Simulation einer solchen Spitzenstunde weist starke Schwankungen sowohl bei den Verlustzeiten als auch bei den Freigabe- und Umlaufzeiten auf. Zwar wurden die Verlustzeiten jeweils über einen Umlauf der Anlage gemittelt, das reicht aber nicht, weil diese Umläufe selbst eine stochastische Größe sind, deren Mittelwert und Statistik sich erst aus genügend häufigen Wiederholungen desselben Szenarios, aber mit leicht verschiedenen Details ergibt – ganz so wie in der Realität, wenn aufeinanderfolgende Tage betrachtet werden. Um zu statistisch validen Ergebnissen zu kommen, wurde in diesem Fall die Spitzenstunde 50-mal wiederholt. Jeweils in Fünf-Minuten-Intervallen wurden die Mittelwerte der Verlustzeiten über den letzten Umlauf und die dazu gehörende, von der Anlage eingestellte Freigabezeit gesammelt. Aus diesen Daten setzen sich dann die Ergebnisse in Abb. 15.7 zusammen.

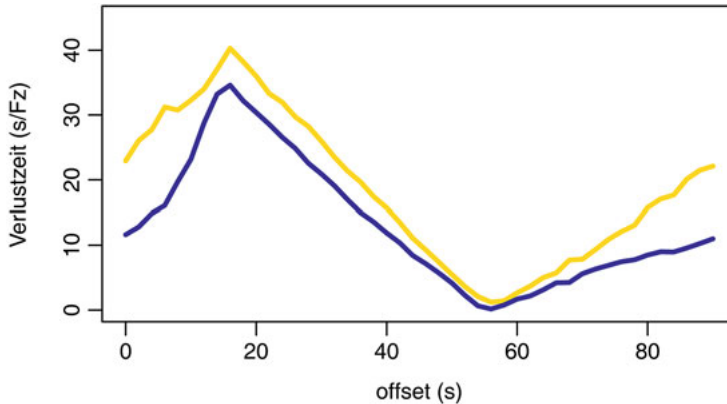


**Abb. 15.7** Freigabezeiten (links) und Verlustzeiten (rechts) an einer simulierten adaptiven Anlage, dargestellt als Funktion der Zeit und für verschiedene Anteile autonomer Fahrzeuge,  $\eta = 0\%$ ,  $25\%$ ,  $50\%$ ,  $75\%$ ,  $100\%$ . Die Nachfrage war mit  $q_0 = 180$  Fz/h und  $q_1 = 720$  Fz/h parametrisiert

Bei der maximalen Nachfrage verlängert die Anlage die Freigabezeiten bis zu der Grenze von 40 Sekunden und zeigt damit an, dass sie tatsächlich ihre Sättigung erreicht hat. Allerdings gilt das nur für einen Strom normaler Fahrzeuge. Sobald autonome Fahrzeuge hinzukommen, sinkt der Spitzenwert bei der Verlustzeit, und bei einer Ausstattungsrate von 50 Prozent wird nicht einmal mehr die maximale Freigabezeit erreicht. Das entspricht der Beobachtung in Abschn. 15.4, dass autonome Fahrzeuge nicht nur die Kapazität erhöhen, sondern auch zu einer Reduktion der Freigabezeiten beitragen – ein Effekt, der in diesem Beispiel hier ziemlich deutlich ist, schon ein kleiner Anteil autonom fahrender Fahrzeuge kann sich hier bemerkbar machen.

## 15.6 Grüne Welle mit autonomen Fahrzeugen

Die bisherigen Szenarien haben eine Kreuzung untersucht. Sehr viel interessanter ist der Fall eines Streckenabschnitts mit mehreren Kreuzungen hintereinander, die alle von einer LSA geregelt werden. In diesem Fall spielt die Koordination zwischen den Anlagen, umgangssprachlich als „grüne Welle“ bezeichnet, eine wichtige Rolle. Auch hier wird mithilfe einer Simulation untersucht, wie groß die Auswirkungen der Einführung von autonomen Fahrzeugen sind. Analog dem Vorgehen in [26] wird eine Strecke mit zehn Kreuzungen simuliert und dabei die Koordination verändert. Unverändert bleiben die Nachfrage, die konstant ist, die Grünzeiten und die Umlaufzeiten. Verändert wird lediglich der Offset, also der Zeitpunkt, zu dem die Anlage den Fahrzeugstrom in Fahrtrichtung freigibt. Wenn dieser Zeitversatz zwischen zwei Anlagen gerade der Reisezeit zwischen den beiden Anlagen entspricht, ist das System in seinem optimalen Zustand: Die Verlustzeit der Fahrzeuge an der stromabwärtigen Anlage ist exakt null, wenn die beiden Freigabe-



**Abb. 15.8** Verlustzeit als Funktion der Versatzzeit für eine einfache grüne Welle. Dargestellt ist hier eine Simulation mit menschlichen Fahrern (gelbe Kurve) und eine nur mit autonomen Fahrzeugen (blaue Kurve). Gezeigt ist hier das beste Ergebnis, das zwischen der ersten und der zweiten Kreuzung erreicht wird

zeiten gleich sind. Dann ist einsichtig, dass genauso viele Fahrzeuge die Kreuzung passieren können, wie von der Anlage stromaufwärts losfahren.

Es lässt sich schon ahnen: In diesem Fall sind mit autonomen Fahrzeugen keine Verbesserungen zu erzielen, und genau das demonstriert das Simulationsergebnis in Abb. 15.8. Allerdings verbessern autonome Fahrzeuge im Falle von nicht-optimaler Koordinierung dann doch die Verlustzeiten. Das liegt daran, dass der Pulk von Fahrzeugen, der eine Anlage verlässt, stärker komprimiert ist als im Fall der menschlichen Fahrer.

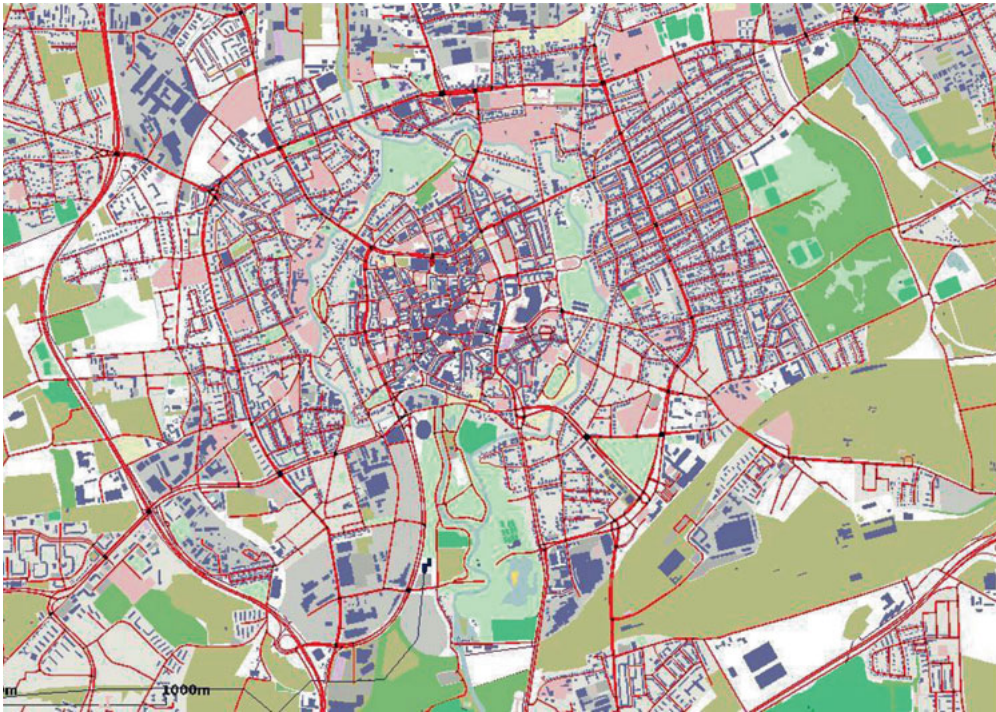
## 15.7 Simulation einer Stadt

Im letzten Abschnitt soll untersucht werden, wie sich die Einführung autonomer Fahrzeuge in einer ganzen Stadt auswirken könnte. Zu diesem Zweck wird eine bestehende SUMO-Simulation [17], [23] der Stadt Braunschweig verwendet, um den Einfluss autonomer Fahrzeuge auf den Verkehrsablauf eines Verkehrssystems bewerten zu können.

Allerdings ist in SUMO das in Abschn. 15.2 eingeführte Modell nicht implementiert, sodass die Simulation mit den Modellen auskommen muss, die in SUMO verfügbar sind. Verwendet wird daher das in SUMO eingebaute Standardmodell, das bei der Beschreibung der Schwankungen der Fahrer nicht so ausgefeilt ist wie das hier eingeführte Modell.

Um das Modell aufzusetzen, wird ein modifiziertes Netz der Firma NavTeq verwendet, in Abb. 15.9 ist ein Ausschnitt des entsprechenden Verkehrsnetzes zu sehen, die ganze Simulation umfasst die gesamte Fläche der Stadt Braunschweig einschließlich der umgebenden Autobahnen. Insgesamt enthält das Simulationsnetz rund 129.000 Kanten.

Die notwendige Nachfrage nach Verkehr stammt aus einer Start/Ziel-Matrix der Firma ptv, die für verschiedene Tage der Woche und für jeden dieser Tage in 24 Zeitscheiben von

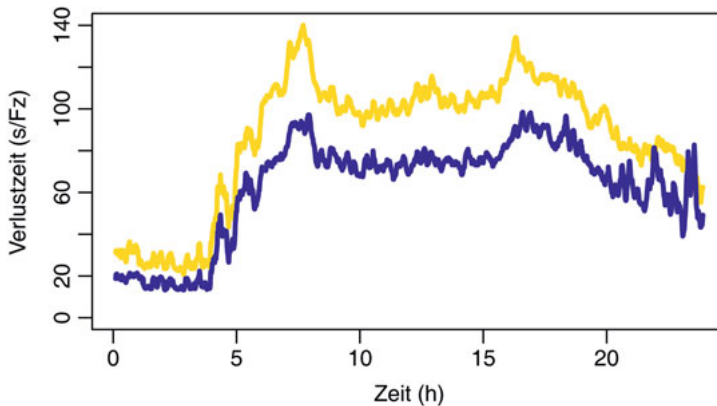


**Abb. 15.9** Ausschnitt aus dem Simulationsnetz der Stadt Braunschweig. Die Flächennutzungsdaten stammen aus der OpenStreetMap-Datenbasis [24]

je einer Stunde Dauer vorliegt. Mit der Nachfrage wurde ein sogenanntes Nutzergleichgewicht ausgerechnet, das in diesem Fall rund 100 Iterationsschritte erforderte. Am Ende dieses Prozesses steht für jedes Fahrzeug, das in SUMO simuliert wird, eine Route, die optimal ist in dem Sinn, dass jede andere Route durch das Netz länger dauert. Insgesamt werden 647.000 Fahrzeuge simuliert. Erste Vergleiche mit realen Zähldaten aus Braunschweig deuten darauf hin, dass die Matrix die Nachfrage deutlich unterschätzt. Das hat sicherlich Auswirkungen auf die hier diskutierten Ergebnisse, allerdings konnten im Rahmen dieses Projektes solche Korrekturen nicht mehr umgesetzt werden.

Um autonome Fahrzeuge simulieren zu können, wird ein neuer Fahrzeugtyp eingeführt, der so ähnlich parametrisiert ist wie die Modelle in Abschn. 15.2: Die autonomen Fahrzeuge in SUMO fahren mit  $\tau = 0,5$  s, alle anderen mit  $\tau = 1$  und  $\sigma = 0,5$ . Dabei ist  $\sigma$  der Rauschparameter in SUMO, welcher vorgibt, um wie viel ein Fahrzeug von der optimalen Fahrweise abweicht. Die Wahl von  $\tau = 0,5$  s führt dazu, dass auch die Schrittweite in SUMO auf 0,5 s gesetzt werden muss, damit die Fahrzeuge weiterhin ohne Zusammenstöße fahren können. Damit verlängert sich die Simulationszeit von rund 50 min auf 90 min für die Simulation eines ganzen Tages in Braunschweig.

Nur die Pkw wurden als autonome Fahrzeuge simuliert: Die rund 44.000 Lkw blieben unverändert. Ebenfalls nicht vollständig korrekt abgebildet sind in dieser Simulation die



**Abb. 15.10** Vergleich der Verlustzeiten zwischen einer Simulation mit menschlichen Fahrern (gelbe Kurve) und einer Simulation, bei der die Pkw autonom fahren (blaue Kurve). Jeder Datenpunkt ist ein gleitender Durchschnittswert aus den acht benachbarten Ein-Minuten-Werten. Die Streuung der Werte beider Kurven ist nicht sehr unterschiedlich und deshalb nicht dargestellt

Lichtsignalanlagen. Somit ist davon auszugehen, dass auch von dieser Seite weitere Korrekturen des unten stehenden Simulationsergebnisses zu erwarten sind.

Trotzdem liefert diese Simulation erste wichtige Erkenntnisse, die in Abb. 15.10 zu sehen sind. Selbst ohne weitere Maßnahmen ist das autonome System in dem Sinne effizienter, dass zwischen fünf und 80 Prozent Verlustzeit eingespart wird, mit einem Mittelwert von rund 40 Prozent. Mit den gewählten Parametern ändert sich allerdings die Varianz der Reisezeiten relativ wenig, das System wird somit zwar schneller, aber nicht unbedingt auch verlässlicher. Das könnte sich ändern, wenn auch das Verkehrsmanagement realistisch simuliert wird, entsprechende Arbeiten werden derzeit vorbereitet.

## 15.8 Fazit

In diesem Beitrag wurden erste Überlegungen angestellt, wie ein Verkehrsmanagement auf die Möglichkeiten des autonomen Fahrens eingestellt werden muss. Die präsentierten Fallbeispiele demonstrieren, dass je nach Szenario ganz verschiedene Verbesserungen im Verkehrsablauf durch das Einführen autonomer Fahrzeuge zu erreichen sind.

Leider lassen sich die zu erreichenden Verbesserungen schwer in eine einzige Zahl zusammenfassen. So wurde beispielsweise in Abschn. 15.4 demonstriert, dass die Kapazität einer LSA sich durchaus verdoppeln lässt. Ist an der entsprechenden Anlage die Nachfrage gering, so ist von dieser Verdoppelung relativ wenig zu merken. Arbeitet die Anlage hingegen am Rande ihrer Kapazität, dann führt schon eine geringfügige Erhöhung der Kapazität zu einer erheblichen Verbesserung.

Das lässt sich sehr schön anhand des Szenarios in Abschn. 15.5 nachvollziehen: Hier durchläuft die Nachfrage alle Werte von sehr gering bis zur (zeitweisen) Übersättigung.

Während bei kleiner Nachfrage sowohl die Freigabezeiten als auch die Verlustzeiten sich relativ wenig mit dem Einführen autonomer Fahrzeuge ändern, erreicht das System jenseits der Kapazität enorme Verbesserungen. Allerdings ist der Umfang dieser Verbesserungen wieder von den Details des betrachteten Szenarios abhängig. Wäre der Spitzenwert der Nachfrage nur ein wenig kleiner gewesen, dann wäre auch der Gewinn deutlich kleiner geworden.

Dennoch bleibt festzuhalten, dass zumindest im urbanen Kontext das Einführen autonomer Fahrzeuge das Potenzial hat, an den Lichtsignalanlagen deutlich Zeit zu gewinnen, die dann anderen Verkehrsteilnehmern zur Verfügung steht – wenn das Einführen dieser Fahrzeuge nicht zu einer Erhöhung der Nachfrage nach automobilem Transport nach sich zieht.

---

## Literatur

1. Winner, H.: Private Korrespondenz. (2014)
2. van Dijke, J., van Schijndel, M., Nashashibi, F., de la Fortelle, A.: Certification of Automated Transport Systems. *Procedia – Social and Behavioral Sciences* 48, 3461–3470 (2012)
3. Kesting, A.: *Microscopic Modeling of Human and Automated Driving: Towards Traffic-Adaptive Cruise Control*, Verlag Dr. Müller, Saarbrücken, ISBN 978-3-639-05859-8 (2008)
4. Reuschel, A.: Fahrzeugbewegung in der Kolonne bei gleichförmig beschleunigtem oder verzögertem Leitfahrzeug. *Zeitschrift des österreichischen Ingenieur und Architektenvereins*, 7/8, 95–98 (1950)
5. Chowdhury, D., Santen, L., Schadschneider, A.: Statistical physics of vehicular traffic and some related systems. *Physics Reports* 329, 199–329 (2000)
6. Helbing, D.: Traffic and Related Self-Driven Many-Particle Systems. *Reviews of Modern Physics* 73, 1067–1141 (2001)
7. Nagel, K., Wagner, P., Woesler, R.: Still flowing: approaches to traffic flow and traffic jam modelling. *Operations Research* 51, 681–710 (2003)
8. Treiber, M., Kesting, A.: *Traffic Flow Dynamics: Data, Models and Simulation*. (2012)
9. Urmson C., et al: Autonomous Driving in Urban Environments: Boss and the Urban Challenge. *Journal of Field Robotics* 25, 425–466 (2008)
10. Levinson, J. et al.: Towards fully autonomous driving: Systems and algorithms. In proceedings of the 2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 163–168 (2011)
11. Campbell M., Egerstedt, M., How, J. P., Murray, R. M.: Autonomous driving in urban environments: approaches, lessons and challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 368, 4649–4672 (2010)
12. Winner, H., Hakuli, S., Wolf, G.: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort* (2011)
13. Helly, W.: Simulation of bottlenecks in single lane traffic flow. *Proceedings of the symposium on theory of traffic flow* (1959)
14. Gipps, P.: A behavioural car-following model for computer simulation. *Transportation Research Part B* 15, 105–111 (1981)
15. Krauß, S.: *Microscopic modelling of traffic flow: Investigation of Collision Free Vehicle Dynamics*, Dissertation, Universität zu Köln (1998)
16. Krauß, S., Wagner, P., Gawron, C.: Metastable states in a microscopic model of traffic flow. *Physical Review E* 55, 5597–5602 (1997)



17. Krajzewicz, D, Erdmann, J., Behrisch, M, Bieker, L.: Recent Development and Applications of SUMO – Simulation of Urban MObility. *International Journal On Advances in Systems and Measurements*, 5, 128–138 (2012)
18. Wagner, P.: Analyzing fluctuations in car-following. *Transportation Research Part B* 46, 1384–1392 (2012)
19. Jiang, R., Hu, M., Zhang, H.M., Gao, Z., Jia, B., Wu, Q., Wang, B., Yang, M.: Traffic Experiment Reveals the Nature of Car-Following. *PLoS ONE* 9: e94351. doi:10.1371/journal.pone.0094351 (2014)
20. Todosiev, E.P., L. C. Barbosa, L.C.: A proposed model for the driver-vehicle-system. *Traffic Engineering*, 34, 17–20, (1963/64)
21. Wagner, P.: A time-discrete harmonic oscillator model of human car-following. *European Physical Journal B* 84, 713–718 (2011)
22. Webster, F.V.: *Traffic Signal Settings*. Department of Scientific And Industrial Research Road Research Laboratory, (1958)
23. Krajzewicz, D., Furian, N., Tomàs Vergés, J.: Großflächige Simulation von Verkehrsmanagementansätzen zur Reduktion von Schadstoffemissionen. 24. Verkehrswissenschaftliche Tage Dresden, Deutschland (2014)
24. OpenStreetMap: [www.openstreetmap.org](http://www.openstreetmap.org), letzter Zugriff am 29.7.2014
25. Oertel, R., Wagner, P.: Delay-Time Actuated Traffic Signal Control for an Isolated Intersection. In: *Proceedings 90th Annual Meeting Transportation Research Board (TRB)* (2011)
26. Gartner, N.H., Wagner, P.: Traffic flow characteristics on signalized arterials. *Transportation Research Records* 1883, 94–100 (2004)

Bernhard Friedrich

## Inhaltsverzeichnis

<b>16.1 Einleitung</b> .....	332
<b>16.2 Charakteristika des Verkehrsflusses</b> .....	332
16.2.1 Kennwerte des Verkehrsablaufs .....	332
16.2.2 Verkehrsflusstheorie .....	333
16.2.3 Modell für stationäre Verkehrszustände – Fundamentaldiagramm .....	335
16.2.4 Kapazität und Stabilität .....	336
<b>16.3 Verkehrliche Wirkung autonomer Fahrzeuge</b> .....	339
16.3.1 Streckenabschnitte von Autobahnen .....	339
16.3.2 Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage .....	344
16.3.3 Abschätzung der Effizienzgewinne durch autonomes Fahren .....	346
<b>16.4 Zusammenfassung und Ausblick</b> .....	347
16.4.1 Verkehr .....	347
16.4.2 Infrastruktur .....	348
16.4.3 Kooperation .....	349
<b>Literatur</b> .....	349

---

B. Friedrich (✉)

Technische Universität Braunschweig, Institut für Verkehr und Stadtbauwesen, Deutschland  
friedrich@tu-braunschweig.de

## 16.1 Einleitung

Autonome Fahrzeuge nehmen selbstständig am Verkehr teil, ohne dass sie den Menschen als Überwacher oder Entscheider benötigen. Ihren Fahrgästen bieten autonome Fahrzeuge einen Komfortgewinn, da keine Fahraufgaben geleistet werden müssen. Einem Personenkreis, der bislang aufgrund von Mobilitätseinschränkungen von der Teilhabe am öffentlichen Leben teilweise oder ganz ausgeschlossen ist, bieten autonome Fahrzeuge neue Chancen für dessen Mobilität.

Neben den Vorteilen, die autonome Fahrzeuge für deren Nutzer bieten mögen, ist der gesellschaftliche Nutzen, der mit ihrer Verbreitung verbunden ist, von Interesse. Denn es ist offensichtlich, dass autonomes Fahren zu keinen Einbußen bei der Sicherheit oder der Effizienz des Straßenverkehrs führen darf, sondern diese verbessern soll. Dieser Beitrag untersucht in diesem Zusammenhang die verkehrlichen Wirkungen autonomer Fahrzeuge hinsichtlich der Effizienz, mit der die bestehende Infrastruktur genutzt werden könnte.

Die Effizienz von Verkehrsanlagen wird durch ihre Kapazität bestimmt. Auf den Fernstraßen ist die Kapazität im Wesentlichen durch den maximal möglichen Verkehrsfluss auf den Streckenabschnitten sowie die maximal möglichen Verflechtungs- und Ein- bzw. Ausfädelungsverkehrsstärken an den planfreien Knotenpunkten bestimmt. Im Stadtstraßennetz und auf Landstraßen mit Ortsdurchfahrten sind die Kapazitäten an den Knotenpunkten maßgebend und somit meist von den Lichtsignalanlagen abhängig. Während die Kapazität an Lichtsignalanlagen von den Zeitbedarfswerten bestimmt wird, die die einzelnen Fahrzeuge benötigen, um in der anfahrenen Kolonne den Knotenpunkt zu passieren, werden die Kapazitäten von Autobahnabschnitten durch die Instabilität bestimmt, die sich bei hohen Verkehrsstärken einstellt und zum Stau führt.

Für das Verständnis der Überlegungen zu den verkehrlichen Wirkungen autonomer Fahrzeuge werden in diesem Beitrag zunächst die Kennwerte des Verkehrsablaufs und ihre Zusammenhänge erläutert. Auf diesen Grundlagen aufbauend werden dann Überlegungen zum Einfluss autonomer Fahrzeuge auf die Kapazitäten von freien Strecken im Zuge von Fernstraßen sowie von Knotenpunkten mit Lichtsignalanlagen abgeleitet. Die Auswirkungen autonomer Fahrzeuge auf die Verbindungsqualitäten von Fahrten, die über unterschiedliche Infrastrukturelemente verlaufen, können mit diesen Überlegungen nicht ausreichend beschrieben werden. Dennoch liefern die Betrachtungen eine erste Einschätzung, welche Optimierungspotenziale für die Effizienz des Verkehrsablaufs mit autonomen Fahrzeugen verbunden sein könnten.

---

## 16.2 Charakteristika des Verkehrsflusses

### 16.2.1 Kennwerte des Verkehrsablaufs

Zur mathematischen Abbildung des Verkehrsablaufs wird von einer Abstraktion des Wegenetzes, der Fahrzeuge, der Fahrer sowie deren Verhalten, d. h. von vereinfachenden Annahmen ausgegangen.

Das Wegenetz wird z. B. in freie Strecken und Knotenpunkte aufgeteilt. Gegenstand der Untersuchungen ist dann entweder die freie Strecke oder der Knotenpunkt, wobei gleichbleibende Bedingungen wie Ebenheit, ausreichende Sicht, trockene Fahrbahn etc. vorausgesetzt werden. Hinsichtlich Fahrer und Fahrzeug wird u. a. angenommen, dass deren Eigenschaften wie Reaktionszeit, Risikobereitschaft bzw. technischer Zustand empirisch nachgewiesenen Verteilungen folgen.

Es wird zwischen mehreren Formen der Beschreibung des Verkehrsablaufs unterschieden. Die mikroskopische Abbildungsweise beschreibt die verkehrlich relevanten Merkmale eines Einzelfahrzeugs  $i$ :

- zeitlicher Abstand  $t_i(s)$ ,
- räumlicher Abstand  $x_i(m)$ ,
- Geschwindigkeit  $v_i(km/h)$ .

Die makroskopische Abbildungsweise betrachtet eine Menge von Fahrzeugen und die relevanten Kennwerte eines Verkehrsstroms:

- Verkehrsstärke  $q(Fz/h)$ ,
- Verkehrsdichte  $k(Fz/km)$ ,
- mittlere Geschwindigkeit  $v(km/h)$ .

Der Verkehrsablauf lässt sich erfassen durch Messungen der Kennwerte an einem bestimmten Querschnitt über ein Zeitintervall  $dt$  durch sogenannte lokale Beobachtungen oder Messungen zu einem bestimmten Zeitpunkt über ein Wegintervall  $dx$  als sogenannte momentane Beobachtungen (s. Abb. 16.1).

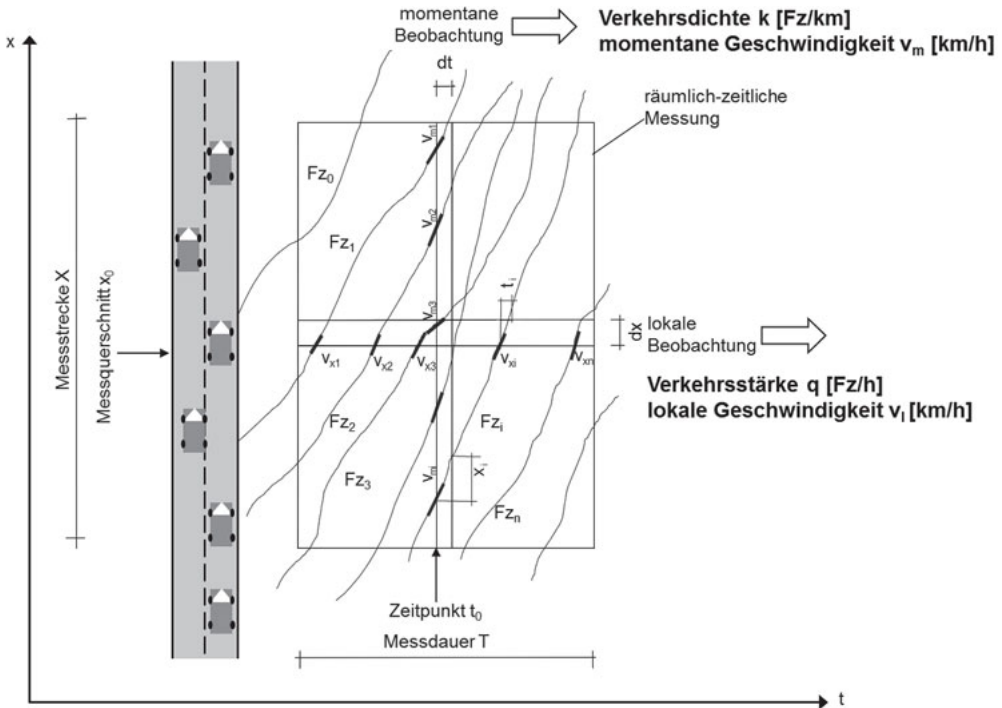
### 16.2.2 Verkehrsflusstheorie

Weder die makroskopischen Kennwerte  $v$ ,  $q$  und  $k$  noch die entsprechenden mikroskopischen Werte definieren für sich allein einen Verkehrszustand. Dazu ist die Kenntnis ihrer gegenseitigen Abhängigkeiten Voraussetzung. Die drei makroskopischen Größen Verkehrsstärke, Verkehrsdichte und momentane (streckenbezogene) Geschwindigkeit sind durch die Gleichung

$$q = k \cdot v(k)$$

miteinander verknüpft. Messungen der Verkehrsstärke und der mittleren Geschwindigkeit ergaben eine nachweisbare Abnahme der Geschwindigkeit bei zunehmender Verkehrsstärke, d. h. mit zunehmender gegenseitiger Beeinflussung der Fahrzeuge.

Eines der ersten Modelle zur Beschreibung des Verkehrsablaufs auf der freien Strecke resultiert aus Beobachtungen von Greenshields [5], der den Zusammenhang zwischen



**Abb. 16.1** Systematik lokaler und momentaner Messungen. Unterschiedliche Geschwindigkeiten ergeben sich für die lokal bzw. momentan erfassten Einzelgeschwindigkeiten

Geschwindigkeit  $v$  und der Verkehrsdichte  $k$  erforschte. Mithilfe der Regressionsrechnung stellte er einen linearen Zusammenhang für  $v = v(k)$  fest

$$v(k) = v_f - \frac{v_f}{k_{max}} \cdot k = v_f \cdot \left(1 - \frac{k}{k_{max}}\right),$$

wobei  $v_f$  die freie Geschwindigkeit und  $k_{max}$  die maximale Verkehrsdichte darstellen.

Eingesetzt in die Gleichung  $q = v \cdot k$  ergibt sich damit ein parabolischer Zusammenhang zwischen Verkehrsstärke und Verkehrsdichte in der Form:

$$q(k) = v_f \cdot \left(k - \frac{k^2}{k_{max}}\right).$$

Gleichungen mit diesen Kenngrößen werden als Zustandsgleichungen und ihre grafische Repräsentation als Fundamentaldiagramme des Verkehrs bezeichnet.

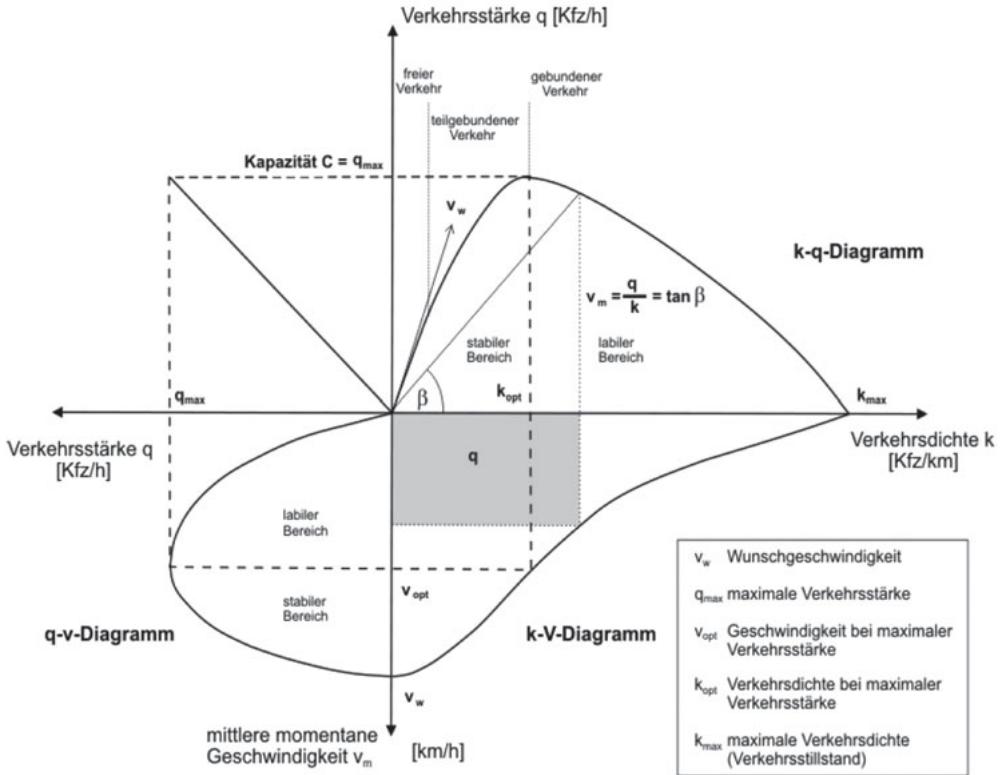


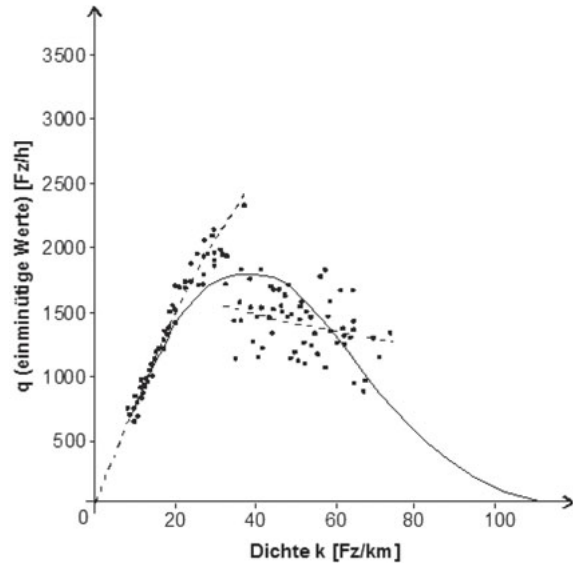
Abb. 16.2 Ansichten des Fundamentaldiagramms [3]

### 16.2.3 Modell für stationäre Verkehrszustände – Fundamentaldiagramm

Das Fundamentaldiagramm ist die grafische Abbildung der Zustandsgleichung des Verkehrs, also des funktionalen Zusammenhangs zwischen den Kenngrößen Verkehrsstärke  $q$ , Verkehrsdichte  $k$  und mittlerer momentaner, d. h. abschnittsbezogener Geschwindigkeit  $v$  und stellt eine Kurve im dreidimensionalen Raum dar. Die orthogonalen Projektionen der Kurve auf die von jeweils zwei Kenngrößen aufgespannten Ebenen ergeben die in Abb. 16.2 gezeigten bekannten Ansichten des Fundamentaldiagramms. Die resultierenden drei Diagramme ermöglichen vielfältige Aussagen über die Charakteristik des Verkehrsflusses an einem Querschnitt und werden als  $q$ - $v$ -Diagramm,  $q$ - $k$ -Diagramm und  $k$ - $v$ -Diagramm bezeichnet.

Das Fundamentaldiagramm lässt erkennen, dass bei gleicher Verkehrsstärke  $q_1$  zwei unterschiedliche Qualitäten des Verkehrsablaufs auftreten können. Die Schwelle  $q_{max}$  trennt für  $q_i < q_{max}$  den Bereich hoher Geschwindigkeiten bei geringen Verkehrsdichten, also den freien und stabilen Verkehrsablauf, vom Bereich mit relativ niedrigen Geschwindigkeiten und hohen Verkehrsdichten, dem Bereich des instabilen und gestörten Verkehrsablaufs. Empirische Untersuchungen zeigen, dass der Übergang zwischen den beiden Bereichen

**Abb. 16.3** Fundamentaldiagramm mit getrennten Bereichen für stabilen und instabilen Verkehr für einzelne Fahrstreifen bzw. zweistreifige Fahrbahn [8]



nicht wie in der idealisierten Form in Abb. 16.2 kontinuierlich verläuft. Vielmehr erfolgt bei hohen Verkehrsstärken, ausgelöst durch Störungen im Verkehrsablauf, ein Übergang aus dem stabilen in den instabilen Bereich, der mit einem deutlichen Rückgang der Verkehrsstärke verbunden ist (s. Abb. 16.3).

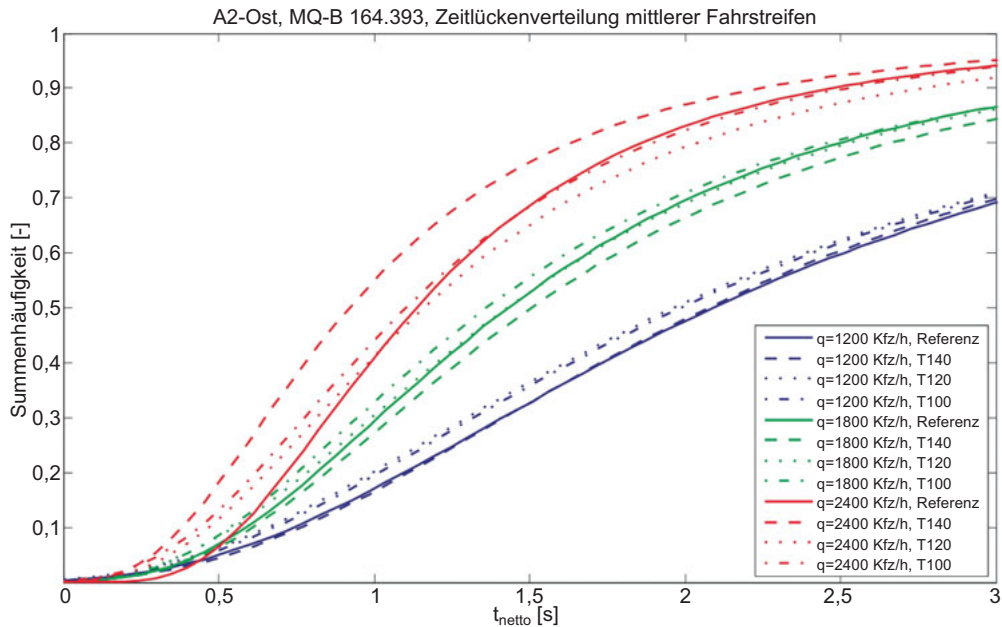
Aus diesen Überlegungen heraus haben May und Keller [9] drei Formen des auftretenden Verkehrs charakterisiert:

- den freien Verkehr mit hohen Geschwindigkeiten und geringen Verkehrsstärken und -dichten,
- den teilgebundenen Verkehr, bis zu dem Bereich maximaler Verkehrsstärken, optimaler Geschwindigkeit und Verkehrsdichte,
- den gebundenen Verkehr mit hohen Verkehrsdichten, geringen Verkehrsstärken und Geschwindigkeiten.

### 16.2.4 Kapazität und Stabilität

Die Effizienz des Verkehrssystems ist abhängig von der Kapazität einer Verkehrsanlage, die als die „größte Verkehrsstärke, die ein Verkehrsstrom bei gegebenen Weg- und Verkehrsbedingungen an dem für ihn bestimmten Querschnitt erreichen kann“ definiert ist [3]. Die Kapazität bestimmt sich durch die Dichte der Fahrzeugkolonne und die Geschwindigkeit, mit der die Fahrzeugkolonne den Querschnitt passiert.

Die Verkehrsdichte wird durch die Abstände zwischen den Fahrzeugen festgelegt. Dabei gilt die Faustregel, dass der Sicherheitsabstand in Metern, den ein Fahrer zum voraus-



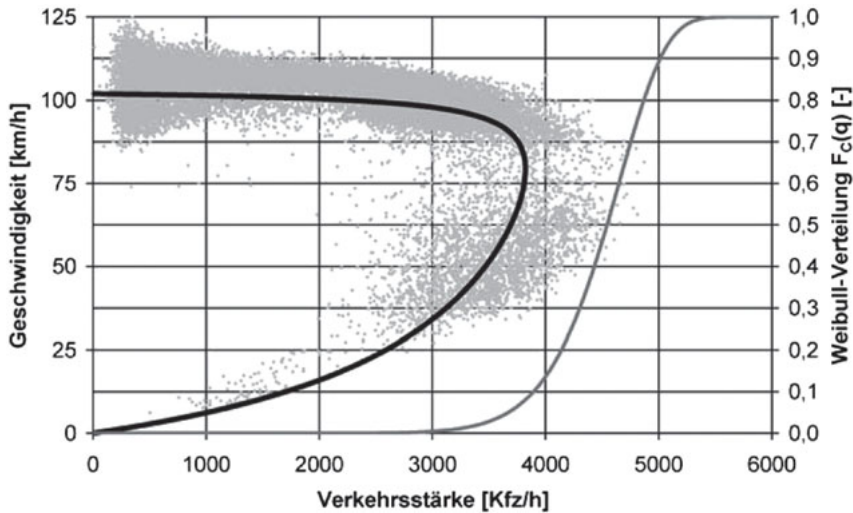
**Abb. 16.4** Verteilungsfunktionen der Zeitlückenverteilung für unterschiedliche Verkehrsnachfragen und Geschwindigkeitsbeschränkungen [2]

fahrenden Fahrzeug einhalten soll, den halben Wert der aktuellen Geschwindigkeit in Kilometern pro Stunde beträgt. Diese allgemein bekannte Regel des „halben Tachoabstands“ geht von einer Reaktionszeit aus, die kleiner als  $1,8\text{ s}$  ist, da bei diesem Wert und gleichbleibender Geschwindigkeit genau der Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug zurückgelegt wird. Dieser Mindestabstand wird auch üblicherweise in der Rechtsprechung gefordert (s. z. B. [7]). Für Lkw schreibt die Straßenverkehrsordnung bei Geschwindigkeiten über  $50\text{ km/h}$  ausdrücklich einen Mindest-Wegabstand von  $50\text{ m}$  vor, der bei der zulässigen Höchstgeschwindigkeit für Fahrzeuge über  $7,5\text{ t}$  auf Autobahnen eine Zeitlücke von  $2,25\text{ s}$  erfordert.

Ausgehend von einer Reaktionszeit von  $1,8\text{ s}$  kann in einem einfachen Ansatz die Kapazität eines Fahrstreifens also mit etwa  $2000$  Fahrzeugen pro Stunde angesetzt werden. Dies gilt gleicherweise für Stadtstraßen wie für Landstraßen oder Autobahnen. Empirische Untersuchungen zeigen allerdings, dass die Zeitlücken im Mittel deutlich unterhalb der  $1,8\text{ s}$  liegen und insbesondere bei hohen Verkehrsstärken Werte um die  $1,0\text{ s}$  einnehmen. Die  $15\%$ -Perzentile der Verteilung liegt in diesen Fällen sogar bei Werten unter  $0,5\text{ s}$  (s. auch Abb. 16.3). Dies bedeutet, dass  $15\%$  der Fahrzeuge mit Zeitlücken, die kleiner als  $0,5\text{ s}$  sind, auf das vorausfahrende Fahrzeug folgen. Abb. 16.4 zeigt für unterschiedliche Verkehrsstärkebereiche und unterschiedliche Geschwindigkeitsbeschränkungen die korrespondierenden Zeitlückenverteilungen.

Aufgrund der geringen Folgeabstände bei relativ hohen Geschwindigkeiten werden in empirischen Untersuchungen auch Kapazitäten ermittelt, die deutlich über den genannten





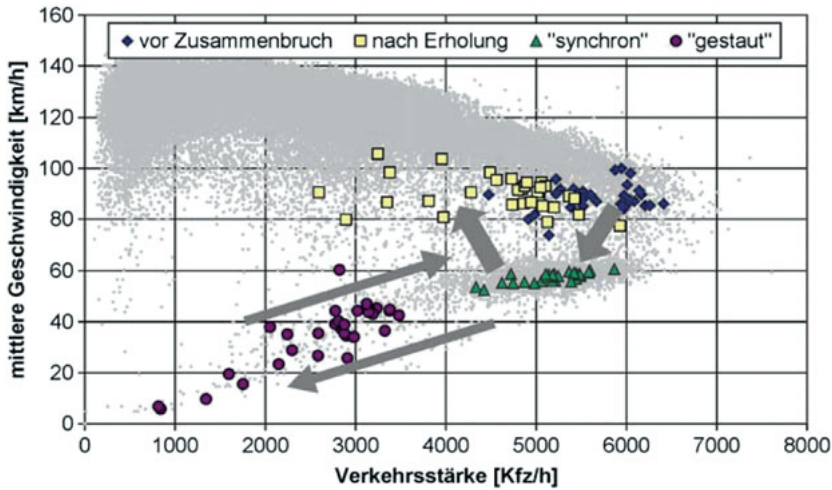
**Abb. 16.5** Messwerte für Fünf-Minuten-Intervalle im q-v-Diagramm und die zugehörige Kapazitätsverteilung für einen zweistreifigen Autobahnquerschnitt [1]

2000 Kfz/h liegen können. Ferner zeigen diese Untersuchungen, dass es keinen exakten Wert gibt, bis zu dem der Verkehrsfluss immer stabil verläuft und genau dann zusammenbricht, wenn dieser Wert überschritten wird. Vielmehr ist zu beobachten, dass die Kapazität eine Zufallsgröße darstellt, die durch eine Verteilung dargestellt werden kann. Untersuchungen [1] an vielen Streckenabschnitten zeigen, dass Kapazitäten von Autobahnen typischerweise Weibull-verteilt sind und z.B. für dreistreifige Richtungsfahrbahnen eine Standardabweichung von ca. 600 Kfz/h (gemessen in Fünf-Minuten-Intervallen) und damit eine unerwartet breite Variabilität aufweisen.

Der Erwartungswert der Kapazität entspricht in dieser stochastischen Sichtweise einer Nennkapazität und stellt das 50%-Perzentil der Verkehrsstärkewerte dar, die Ausgangspunkt eines Zusammenbruchs waren. Je näher die Verkehrsbelastung an dieser Nennkapazität bzw. darüber liegt, umso höher wird die Wahrscheinlichkeit des Zusammenbruchs und eines Staus.

Der Zusammenbruch führt in allen Fällen über den Zustand des synchronisierten Verkehrs zum Stau, und auch die Erholung verläuft über den synchronisierten Verkehr zurück zu einem stabilen Verkehrsablauf mit höheren Geschwindigkeiten (s. Abb. 16.6). Die Verkehrsstärke geht in den Übergängen zum synchronisierten bzw. zum gestauten Verkehr jeweils zurück, und eine Erholung erfolgt auf einem niedrigeren Niveau. Dieser Effekt des *capacity drop* wird dadurch verursacht, dass die Fahrer beim Verlassen der stromabwärtigen Staufront einen größeren Abstand einhalten als zuvor im fließenden Verkehr vor dem Zusammenbruch.

Nach Hall und Agyemang-Duah [6] liegt dieser *capacity drop* bei 5–6%, Untersuchungen von Brilon und Ponzlet [10] auf deutschen Autobahnen ergaben Werte zwischen 4 und 12%.



**Abb. 16.6** Muster der Verkehrsdynamik mit den Übergängen zwischen den Zuständen des stabilen in den synchronen und gestauten Verkehr. Die Werte wurden an einer dreistreifigen Fahrbahn in Fünf-Minuten-Intervallen gemessen [1]

## 16.3 Verkehrliche Wirkung autonomer Fahrzeuge

Die Effizienz des Verkehrssystems ist abhängig von der Kapazität einer Verkehrsanlage. Bei einer Nutzung der Verkehrsanlage durch autonom fahrende Fahrzeuge wird sich die Kapazität gegenüber einer Nutzung durch menschliche Fahrer verändern. Für den Verkehrsfluss sind entweder die Kapazitäten der Streckenabschnitte oder der Knotenpunkte maßgebend. Während für die Leistungsfähigkeit städtischer Straßennetze vor allem die Kapazitäten der Knotenpunkte und dort der Lichtsignalanlagen relevant sind, sind auf Autobahnen auch die Kapazitäten freier Strecken ausschlaggebend. Aus diesem Grund betrachten die folgenden Überlegungen die Kapazitäten für beide Fälle unter Berücksichtigung, dass ein noch nicht bekannter Anteil der Fahrzeuge autonom fährt.

### 16.3.1 Streckenabschnitte von Autobahnen

#### 16.3.1.1 Kapazität

Die Kapazität eines Fahrstreifens ist festgelegt durch die maximale Anzahl von Fahrzeugen, die einen Querschnitt während einer Zeiteinheit passieren können. Sie bestimmt sich durch die Dichte der Fahrzeugkolonne und der Geschwindigkeit, mit der die Fahrzeugkolonne den Querschnitt passiert. Die Zustandsgleichung, die das Verhältnis dieser grundlegenden Kenngrößen des Verkehrsablaufs beschreibt, lautet:

$$q = k \cdot v(k).$$

In einem homogenen Verkehrsfluss ist die Dichte einfach zu bestimmen und ergibt sich aus dem Reziprok des Platzbedarfs eines Fahrzeugs [11]:

$$k = \frac{1}{vT_h + L}.$$

In diesem Zusammenhang ist  $T_h$  der zeitliche Abstand (Zeitlücke) zum vorausfahrenden Fahrzeug und  $L$  die Länge eines Fahrzeugs. Da die Kapazität die maximale Verkehrsstärke  $q_{max}$  darstellt, ist diese folglich eine Funktion von  $v$ ,  $T_h$  und  $L$ . Für den Fall, dass ausschließlich menschliche Fahrer die Fahrzeuge steuern, ergibt sich die Kapazität  $C_h$  mit:

$$C_h = q_{max} = \frac{v}{vT_h + L}.$$

Analog wird die Kapazität  $C_a$  in einem rein durch autonome Fahrzeuge zusammengesetzten Verkehrsfluss durch die folgende Funktion beschrieben, in der  $T_a$  die von autonomen Fahrzeugen bevorzugte Zeitlücke darstellt:

$$C_a = \frac{v}{vT_a + L}.$$

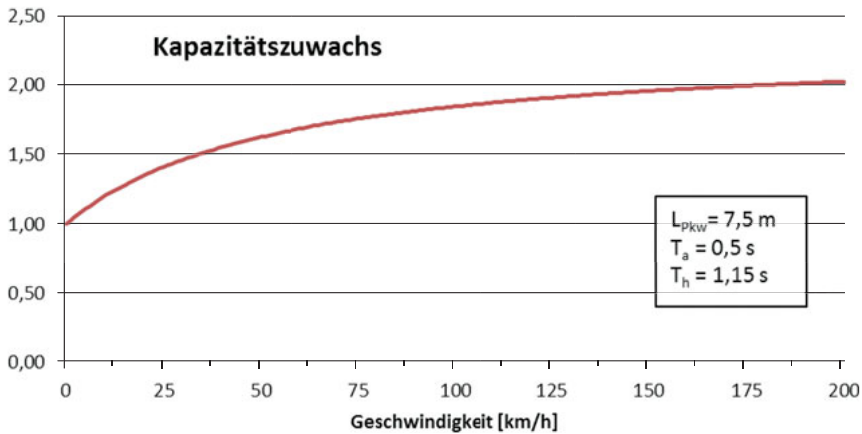
Das Verhältnis der beiden Kapazitätswerte und damit die Veränderung der Kapazität wird durch den Zusammenhang

$$C_a / C_h = (vT_h + L) / (vT_a + L)$$

beschrieben.

Für die Abschätzung des Einflusses autonomer Fahrzeuge auf die Kapazität werden für die Parameter der Kapazitätsformel Größen verwendet, die für heutige Verhältnisse empirisch nachgewiesen sind. So erscheint es sinnvoll als mittlere Geschwindigkeit, bei der die Kapazität erreicht wird, den Wert  $v = 80 \text{ km/h}$  ( $22,2 \text{ m/s}$ ) anzunehmen. Für den Platzbedarf eines mittleren Personenkraftwagens wird das bekannte Maß einer mittleren Fahrzeuglänge von  $4,5 \text{ m}$  und eines minimalen Sicherheitsabstands zum Vordermann von  $3,0 \text{ m}$  und somit  $L_{Pkw} = 7,5 \text{ m}$  verwendet. Als mittlere Länge eines Lastkraftwagens werden  $18 \text{ m}$  als gewichtetes Mittel der Längen eines Lastzuges ( $18,75 \text{ m}$ ) und eines Sattelschleppers ( $16,50 \text{ m}$ ) angesetzt. Für den Platzbedarf eines Lastkraftwagens ergeben sich unter Berücksichtigung von  $3,0 \text{ m}$  Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug  $L_{Lkw} = 21 \text{ m}$ . Als realistische Größe für den mittleren zeitlichen Folgeabstand bei hohen Verkehrsstärken liefern die empirischen Untersuchungen einen Wert von  $T_h = 1,15 \text{ s}$ .

Für die Veränderung der Kapazität bei autonomem Fahren ist die veränderte Folgezeitlücke  $T_a$  ausschlaggebend. Als technisch realisierbar und zugleich aus Sicht der Verkehrsteilnehmer akzeptabel erscheint hierfür ein Wert von  $T_a = 0,5 \text{ s}$ . Dieser sehr kurze Folgeab-



**Abb. 16.7** Kapazitätswachstum, das sich bei einer ausschließlich autonomen Fahrzeugflotte (nur Pkw) in Abhängigkeit der Geschwindigkeit ergeben würde

stand tritt bereits heute in Abhängigkeit der Verkehrsverhältnisse bei bis zu 20% aller Folgeabstände auf. Insofern scheint dieser Abstand akzeptabel, sofern aus technischer Sicht die Sicherheit gewährleistet ist.

Für die unterstellten Größen würde sich bei Verwendung der oben hergeleiteten Formeln die Kapazität und damit der maximale Durchfluss im Falle eines rein autonomen Verkehrs deutlich erhöhen (Faktor 1,78) (s. Abb. 16.7).

Gegenüber den heute beobachteten Kapazitätswerten eines Fahrstreifens von 2200 *Kfz/h* wäre damit bei einem rein autonomen Verkehr eine Steigerung der Verkehrsstärke auf etwa 3900 *Kfz/h* möglich.

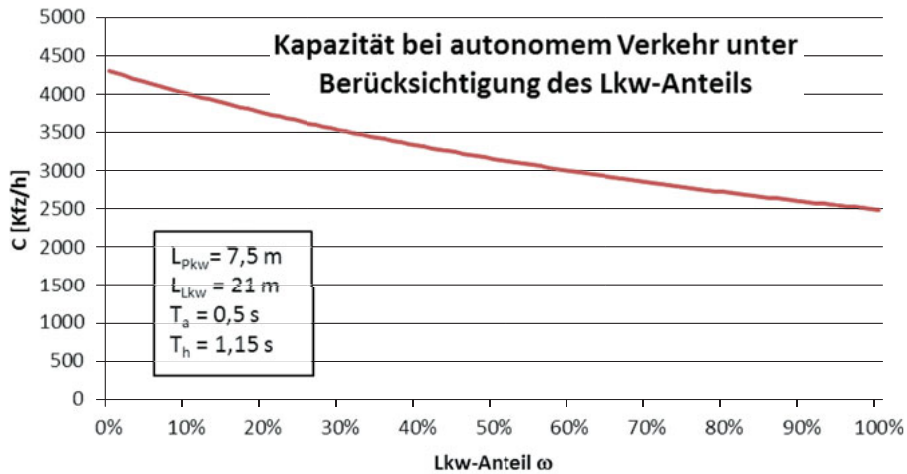
Wird der Schwerverkehr im Verkehrsfluss berücksichtigt, so kann der mittlere Platzbedarf der Fahrzeuge aus einer mit dem Schwerverkehrsanteil  $\omega$  gewichteten Summe gebildet werden. Die Verkehrsdichte erhält man dann wiederum aus dem Reziprok des mittleren Platzbedarfs eines Fahrzeugs mit

$$k = \frac{1}{(1-\omega)(vT_h + L_{Pkw}) + \omega(vT_h + L_{Lkw})}$$

Für die Kapazität ergibt sich bei dieser Betrachtung der Zusammenhang

$$C = \frac{v}{(1-\omega)(vT_a + L_{Pkw}) + \omega(vT_a + L_{Lkw})}$$

Geht man von einer für den autonomen Verkehr auf Autobahnen moderaten Geschwindigkeit von 80 *km/h* aus, so erhält man den im folgenden Diagramm dargestellten funktionalen Zusammenhang. Für einen auf deutschen Autobahnen typischen Lkw-Anteil von 15% würde sich dann eine Kapazität von etwa 3877 *Kfz/h* und damit nahezu der doppelte Wert



**Abb. 16.8** Kapazität eines Fahrstreifens bei rein autonomem Verkehr in Abhängigkeit des Lkw-Anteils

gegenüber heute empirisch nachgewiesenen Kapazitäten einstellen. Setzt man in die Kapazitätsformel für eine Plausibilitätsprüfung  $T_a = 1,15 \text{ s}$  bei ansonsten unveränderten Parametern, ergibt sich bei einem Schwerverkehrsanteil von 15% eine Kapazität von etwa  $2280 \text{ Kfz/h}$ . Dieser Wert entspricht den bei heutigen Verhältnissen gemessenen Kapazitäten und bestätigt die richtige Wahl des Rechenansatzes sowie der Parameter.

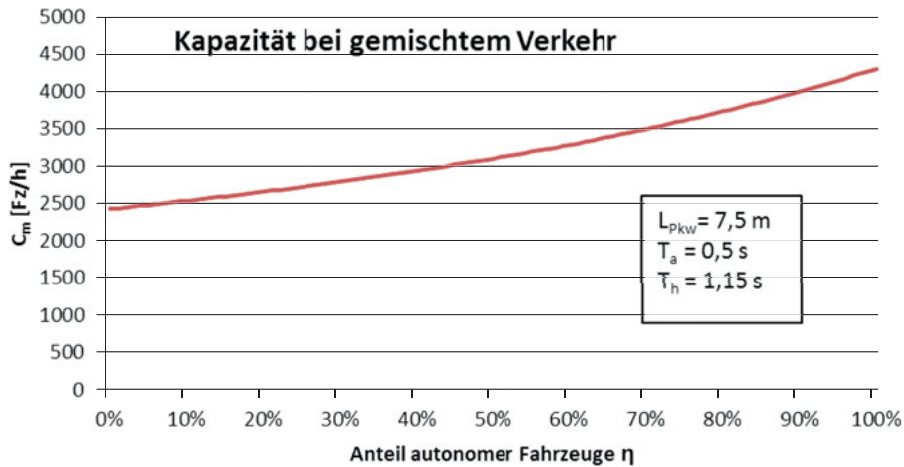
Bei gemischtem Verkehr, in dem autonome Fahrzeuge mit einem Anteil von  $\eta$  am Gesamtaufkommen vertreten sind, ist die Kapazität  $C_m$  zusätzlich von der Anteilsgröße  $\eta$  abhängig:

$$C_m = \frac{v}{\eta v T_a + (1 - \eta) v T_h + L_{pkw}}$$

Setzt man auch hier wiederum mit  $v = 80 \text{ km/h}$  und  $L_{pkw} = 7,5 \text{ m}$  realistische Größen in die Gleichung ein, ergibt sich der im folgenden Diagramm dargestellte Zusammenhang (s. Abb. 16.9). Aus der Abbildung wird deutlich, dass die Kapazität bei geringeren Ausstattungsgraden unterproportional anwächst und bei  $\eta = 0,5$  erst einen Wert von etwa  $3100 \text{ Pkw/h}$  und damit von 36% der möglichen Steigerung bei Vollaussattung erreicht.

Berücksichtigt man darüber hinaus, dass autonome Fahrzeuge einen zusätzlichen Abstand auf ein von einem menschlichen Fahrer gelenktes Fahrzeug lassen sollten, um diesen Fahrer nicht zu bedrängen, wird die Bestimmung der Kapazität etwas komplizierter. In dieser Betrachtung müssen die Kombinationen aufeinanderfolgender Fahrzeuge (a-a, a-h, h-a, und h-h) und die zugehörigen Zeitlücken ( $T_{aa}$ ,  $T_{ah}$ ,  $T_{hx}$ ) betrachtet werden, um zu einer modifizierten Kapazitätsgleichung zu gelangen:

$$C_m = \frac{v}{\eta^2 v T_{aa} + \eta(1 - \eta) v T_{ah} + (1 - \eta) v T_{hx} + L}$$



**Abb. 16.9** Kapazität eines Fahrstreifens in Abhängigkeit des Anteils autonomer Fahrzeuge bei reinem Pkw-Verkehr

Als realistische Werte können für die Zeitlückendauern die Werte  $T_{aa} = 0,5 \text{ s}$ ,  $T_{ah} = 0,9 \text{ s}$ ,  $T_{hx} = 1,15 \text{ s}$  angenommen werden. In dieser Betrachtung steigt die Kapazität in Abhängigkeit der Ausstattungsrate im unteren Bereich noch etwas langsamer an und erreicht für  $\eta = 0,5$  einen Wert von  $2850 \text{ Kfz/h}$ , um bei einer Ausstattung von 100% den Kapazitätswert von knapp  $4300 \text{ Kfz/h}$  zu erreichen (s. Abb. 16.10).

Dieselbe Vorgehensweise kann für die Abschätzung der Kapazität für reinen Lkw-Verkehr angewendet werden, der auf einem Fahrstreifen einer Autobahn organisiert werden könnte. Bei unveränderten Annahmen für die erforderlichen Zeitlücken wird der Platzbedarf wiederum mit  $L = 21 \text{ m}$  gewählt. Mit diesen Eingangswerten ergibt sich bei rein autonomem Fahren ein Kapazitätswert von  $2420 \text{ Lkw/h}$  anstatt der bei menschlichen Fahrern erreichbaren  $1720 \text{ Lkw/h}$ .

### 16.3.1.2 Stabilität

Neben der Kapazität, die die größte Verkehrsstärke darstellt, die ein Verkehrsstrom bei gegebenen Weg- und Verkehrsbedingungen an dem für ihn bestimmten Querschnitt erreichen kann, ist insbesondere die Stabilität des Verkehrsablaufs für die Effizienz von Bedeutung. Deutlich wird dies, wenn die Kapazität als stochastische Größe betrachtet wird, die die Wahrscheinlichkeit des Zusammenbruchs in Abhängigkeit der Verkehrsstärke wiedergibt. Je größer die Standardabweichung in der Wahrscheinlichkeitsverteilung ist, umso größer ist die Wahrscheinlichkeit des Zusammenbruchs bereits bei geringeren Verkehrsstärken und damit die Instabilität.

Kommt es zum Zusammenbruch, vermindert sich durch den Effekt des *capacity drop* die Kapazität spürbar in der in der o. g. Literatur [10] angegebenen Größenordnung von etwa 10 %.

Verschiedene orts- und zeitabhängige Faktoren führen bei gleicher Fahrstreifenanzahl und gleichen verkehrlichen Randbedingungen (Verkehrsstärke, Schwerverkehrsanteil) zu



**Abb. 16.10** Kapazität eines Fahrstreifens in Abhängigkeit des Anteils autonomer Fahrzeuge bei reinem Pkw-Verkehr unter Berücksichtigung größerer Folgezeitlücke von autonomen Fahrzeugen auf von Fahrern gelenkte Fahrzeuge

unterschiedlichen Verteilungsfunktionen der Kapazität. Wesentliche Einflussfaktoren sind in diesem Zusammenhang die Geschwindigkeits- und die Zeitlückenverteilungen. Je geringer die Standardabweichungen sind, umso stabiler ist der Verkehrsablauf und umso weniger Zusammenbrüche sind auch bei hohen Verkehrsstärken zu erwarten.

Autonome Fahrzeuge werden, insbesondere wenn sie durch Kommunikation untereinander die Aktionen der vorausfahrenden Fahrzeuge antizipieren können, zu einer Verstetigung des Verkehrsablaufs und somit zur Stabilität beitragen. Bei einem rein autonomen Verkehr ist davon auszugehen, dass eine vollständige Stabilität erreicht wird und ein Kapazitätsabfall vermieden werden kann.

### 16.3.2 Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage

Da Knotenpunkte im Zuge höher belasteter Straßen in der Regel mit Lichtsignalanlagen geregelt werden, beziehen sich die folgenden Überlegungen auf die Kapazitäten von Knotenpunkten mit Lichtsignalsteuerung.

Bei hoher Verkehrsnachfrage kommt es an signalisierten Knotenpunkten unabhängig von der Koordinierung der Lichtsignalanlagen zu einem ständigen Rückstau. Deshalb erfolgt die Anfahrt der wartenden Fahrzeugkolonne bei Beginn der Freigabezeit regelmäßig aus dem Stand. Wenn das erste Fahrzeug bei Beginn der Freigabe angefahren ist, folgt das nächste, wenn ein bestimmter zeitlicher Abstand erreicht ist. Dieser zeitliche Abstand wird durch den Zeitbedarfswert repräsentiert, der für Standardbedingungen (keine Längsneigung, Geradeausverkehr, ausreichende Fahrstreifenbreite) und reinen Pkw-Verkehr  $t_b = 1,8 \text{ s}$  beträgt [4]. Dies entspricht einer Sättigungsverkehrsstärke von  $q_s = 2000 \text{ Pkw/h}$ . Für Lkw und Busse werden als Zeitbedarfswert  $t_b = 3,15 \text{ s}$  und für Lastzüge  $t_b = 4,5 \text{ s}$  angegeben.

Im Kolonnenstart kann der Anfahrzeitpunkt aufgrund der Bewegung der vorausfahrenden Fahrzeuge antizipiert werden. Dadurch reduziert sich die Reaktionszeit auf das Losfahren des direkten Vordermanns und kann mit  $T_h = 0,6 \text{ s}$  angenommen werden. Für einen mittleren Platzbedarf eines Pkw im Rückstau vor einer Lichtsignalanlage von  $7,5 \text{ m}$  (bei einer Fahrzeuglänge von  $4,5 \text{ m}$  und einem Abstand von Stoßstange zu Stoßstange von  $3,0 \text{ m}$ ) sowie plausiblen Werten für die durchschnittliche Geschwindigkeit  $v = 22,5 \text{ km/h}$  an der Haltlinie der Lichtsignalanlage erhält man über den Zusammenhang  $t_b = T_h + L/v = 1,8 \text{ s}$  eine Bestätigung des Zeitbedarfswerts. Dies gilt in gleicher Weise für die Zeitbedarfswerte von Lkw und Lastzügen mit einer Länge von  $12 \text{ m}$  bzw.  $18 \text{ m}$ . Folglich kann die Sättigungsverkehrsstärke eines Fahrstreifens an einer Lichtsignalanlage mit der Zustandsgleichung angegeben werden:

$$q_s = \frac{v}{vT_h + L}.$$

Für die Betrachtung der Sättigungsverkehrsstärken rein autonomem und gemischten Verkehrs gelten die Zusammenhänge, die für die Kapazität von Streckenabschnitten abgeleitet wurden mit den hier für den Kolonnenstart an Lichtsignalanlagen unterstellten Werten von  $v = 22,5 \text{ km/h} = 6,25 \text{ m/s}$ ,  $T_h = 0,6 \text{ s}$ . Für das autonome Fahren wird unterstellt, dass die Reaktionszeit bzw. der Sicherheitsabstand auch im dichten und langsamen Stadtverkehr folgende Werte nicht unterschreiten soll:  $T_a = 0,3 \text{ s}$ ,  $T_{aa} = 0,3 \text{ s}$ ,  $T_{ah} = 0,6 \text{ s}$ ,  $T_{hx} = 0,6 \text{ s}$ .

Die Kapazität eines Fahrstreifens an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage wird einerseits von den Sättigungsverkehrsstärken und andererseits von der zur Verfügung stehenden Freigabezeit bestimmt. Die Freigabezeiten, die während einer Stunde den verschiedenen Verkehrsströmen zur Verfügung gestellt werden können, sind ihrerseits abhängig von der Umlaufzeit und den Zwischenzeiten. In den Hauptverkehrszeiten wird meist eine Umlaufzeit von  $90 \text{ s}$  gewählt, sodass während einer Stunde die Zwischenzeiten 40-mal berücksichtigt werden müssen. Geht man von einem typischen, im Zuge einer städtischen Hauptverkehrsstraße gelegenen Knotenpunkt aus, so kommt für diesen häufig ein dreiphasiges Signalprogramm zum Einsatz. Die für eine Hauptrichtung relevanten Zwischenzeiten in den drei Phasenübergängen summieren sich in der Größenordnung auf  $20 \text{ s}$  und sind im Wesentlichen von den Räumzeiten der quer laufenden Fußgänger abhängig. Bei einer Umlaufzeit von  $90 \text{ s}$  verbleiben dann noch  $70 \text{ s}$  für die Freigabezeiten der verschiedenen Ströme. Unterstellt man, dass von der verbleibenden Freigabezeit  $50 \%$  für die Ströme der Hauptrichtung zur Verfügung stehen, ergibt sich während einer Stunde eine Freigabezeit von  $1400 \text{ s}$  bzw. ein Freigabezeitanteil von  $p_F = 38,89 \%$ , also ein Anteil, der in der Größenordnung von etwa  $40 \%$  liegt.

Bei konfliktfreier Signalisierung (d. h. keine bedingten Verträglichkeiten z. B. mit parallel geführten Fußgängern) kann vor diesem Hintergrund die Kapazität von gemischten Verkehrsströmen mit dem o. g. Ansatz ermittelt werden:

$$C_{LSA} = q_s \cdot p_F = \frac{v \cdot p_F}{vT_h + L}.$$



Für heutige Verhältnisse mit ausschließlich durch Menschen gesteuerten Fahrzeugen ergibt sich damit bei Verwendung der o. g. Werte eine Kapazität etwa  $800 \text{ Pkw}/h$  je Fahrstreifen. Bei einem rein autonomen Verkehr mit  $T_a = 0,3 \text{ s}$  würde sich die Kapazität auf etwa  $1120 \text{ Pkw}/h$  und damit um etwa 40 % erhöhen. Für eine gemischte Zusammensetzung der Verkehrsströme liegen die Effizienzgewinne zwischen diesen angegebenen Werten und können mit den oben eingeführten Formeln bestimmt werden.

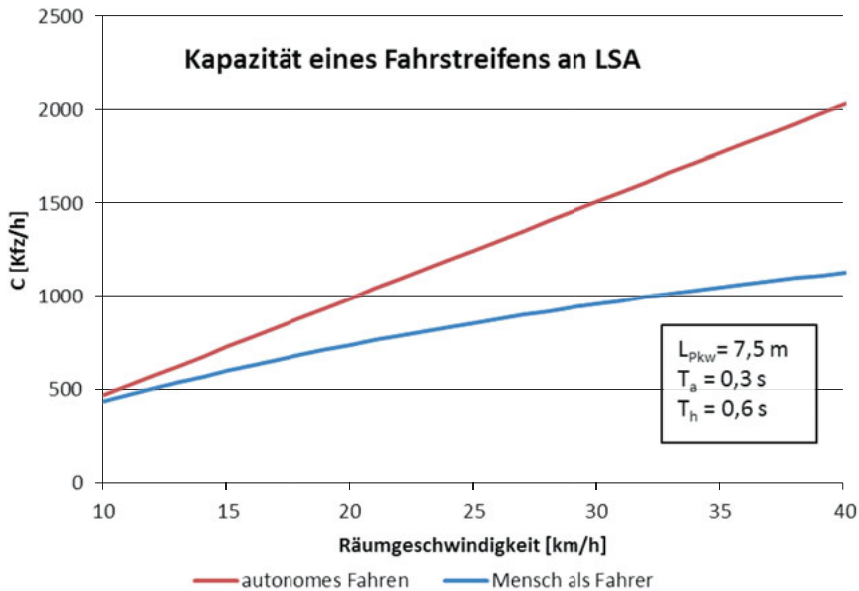
Die Formel macht außerdem deutlich, dass neben der Dauer der Folgezeitlücken vor allem die Geschwindigkeit von Bedeutung für die Kapazität ist. Mit steigender Räumgeschwindigkeit wächst die Kapazität bei autonomem Verkehr überproportional gegenüber einem Verkehr mit Menschen als Fahrern (s. Abb. 16.11). Gelingt es also, beim autonomen Fahren neben den kürzeren Zeitlücken auch ein zügigeres Anfahren und Räumen zu erreichen, ist damit ein deutlich höherer Kapazitätsgewinn als die oben angegebenen 40 % zu erwarten.

### 16.3.3 Abschätzung der Effizienzgewinne durch autonomes Fahren

Die Abschätzungen der Wirkung autonomer Fahrzeuge auf die Kapazität als Maß für die Effizienz von Verkehrsanlagen zeigen signifikante Steigerungspotenziale sowohl für die Streckenabschnitte von Fernstraßen als auch für die Knotenpunkte im Zuge städtischer Hauptverkehrsstraßen.

Im Stadtverkehr könnte bei rein autonomem Verkehr eine Kapazitätserhöhung von etwa 40 % erreicht werden, während die Kapazitäten auf Autobahnabschnitten um etwa 80 % gesteigert werden könnten. Der deutliche Unterschied in den Steigerungspotenzialen ist in der durchschnittlichen Geschwindigkeit, mit der die Verkehrsanlagen befahren werden, begründet. Dies wird aus dem Verlauf des Funktionsgraphen in Abb. 16.7 deutlich, der einen überproportionalen Anstieg der Kapazität im Bereich geringerer Geschwindigkeiten zeigt und hin zu höheren Geschwindigkeiten abflacht. Bei Erreichen der Kapazität liegen die Geschwindigkeiten auf Autobahnen bei etwa  $80 \text{ km}/h$ . Auf städtischen Hauptverkehrsstraßen ergibt sich beim für die Kapazität maßgebenden Kolonnenstart an Lichtsignalanlagen eine durchschnittliche Geschwindigkeit von etwa  $20 \text{ km}/h$ . Wegen dieses Unterschieds in den Geschwindigkeiten wirken sich autonome Fahrzeuge sehr unterschiedlich auf die Kapazität der Verkehrsanlagen aus.

Neben dem Kapazitätswert, der unter Berücksichtigung autonomer Fahrzeuge erreicht werden kann, ist insbesondere die Stabilität des Verkehrsablaufs bei hohen Verkehrsstärken von Bedeutung. Im Stadtverkehr kommt es zwar ab einer Auslastung von 70 %–80 % zu einem ständigen Rückstau vor den maßgebenden Lichtsignalanlagen, weshalb bei hohen Belastungen eine Durchfahrt ohne Halt (grüne Welle) nicht mehr möglich ist, aber es entsteht kein Leistungsabfall (*capacity drop*), wie dies im Außerortsverkehr und vor allem auf Autobahnen der Fall ist. Insofern ist die Stabilität des Verkehrsablaufs im städtischen Straßennetz bis zum Erreichen der Kapazität nicht gefährdet und erst bei einer Überlastung kommt es zu Blockaden in den Knotenpunkten.



**Abb. 16.11** Kapazitätswerte für einen Fahrstreifen an einer Lichtsignalanlage in Abhängigkeit der Raumgeschwindigkeit

## 16.4 Zusammenfassung und Ausblick

### 16.4.1 Verkehr

Die Überlegungen mithilfe der makroskopischen Modelle des Verkehrsflusses zeigen, dass durch autonome Fahrzeuge grundsätzlich eine signifikante Kapazitätssteigerung zu erwarten ist, wodurch bestehende Verkehrsinfrastrukturen effizienter genutzt werden könnten. In Verbindung mit der erwarteten Steigerung der Kapazität für bestehende Verkehrsinfrastrukturen reduzieren sich Stauungen und Verlustzeiten, wodurch in der Folge die Qualität des Verkehrsablaufs erhöht wird. Insbesondere zwei Effekte bewirken die Kapazitätssteigerung:

1. Ein Effekt ist die Reduktion der Zeitlücken zwischen autonomen Fahrzeugen. In diesem Zusammenhang erscheint es bedeutsam, dass der Fahrkomfort trotz kurzer Zeitlücken durch die Antizipation der Aktionen der vorausfahrenden Fahrzeuge und der dadurch ermöglichten geringeren Beschleunigungs- bzw. Verzögerungswerte gesichert wird. Dies könnte auch für die Kolonnenstabilität von Bedeutung sein. Für die Antizipation erscheint die Kommunikation zwischen den Fahrzeugen und auch zwischen Fahrzeugen und der Infrastruktur eine wichtige Voraussetzung zu sein.
2. Neben der Zeitlückendauer ist die Geschwindigkeit des Fahrzeugpulkus von großer Bedeutung. Je höher die Geschwindigkeit bei konstanter Dichte ist, umso höher ist die Verkehrsstärke an einem Querschnitt. Hohe Geschwindigkeiten bei gleichbleibender

Verkehrsdichte sind jedoch nur im rein autonomen Verkehr möglich. Bereits ein von einem Menschen gelenktes Fahrzeug würde in der Kolonne zu langsameren Geschwindigkeiten führen und den Kapazitätsgewinn reduzieren.

### 16.4.2 Infrastruktur

Die entwickelten Modelle für den Verkehrsfluss und die Kapazität unter Berücksichtigung eines Anteils autonomer Fahrzeuge zeigen, dass die Kapazität mit dem Anteil autonomer Fahrzeuge überproportional anwächst. Dabei ist zu bemerken, dass die Verkürzung der Zeitlücken schon ab dem ersten autonomen Fahrzeug wirkt, die Steigerung der Geschwindigkeit bei hohen Dichten hingegen nur für rein autonomen Verkehr und damit bei höheren Ausstattungsraten möglich sein wird.

Die Einführung autonomer Fahrzeuge wird nach Meinung des Autors nur über deren Fähigkeit gelingen, sich im gemischten Verkehr sicher zu bewegen, da reservierte Bewegungsflächen gerade bei geringen Ausstattungsraten weder ökonomisch noch sozial zu vertreten wären. Sobald jedoch eine ausreichende Anzahl Fahrzeuge mit autonomen Fähigkeiten im Verkehr sein werden, wird es für die Effizienz des Verkehrs sehr vorteilhaft sein, autonomes Fahren auf reservierten Fahrstreifen zu konzentrieren. Durch eine Separierung kann wegen des nicht-linearen Verlaufs der Kapazität über dem Anteil autonomer Fahrzeuge der Nutzen maximiert werden. In Verbindung mit speziell gewidmeten Fahrstreifen könnte zudem die Kolonnengeschwindigkeit selbst bei größerer Verkehrsnachfrage erhöht werden, was zu weiteren deutlichen Kapazitätsgewinnen führen würde. Dies ist bei gemischtem Verkehr nicht möglich, da selbst bei wenigen von Menschen gelenkten Fahrzeugen diese die Geschwindigkeit vorgeben würden.

Im Rahmen einer ersten Auseinandersetzung mit dem weitreichenden Thema wurden bewusst in diesem Beitrag ausschließlich die verkehrlichen Wirkungen autonomer Fahrzeuge auf Streckenabschnitten von Autobahnen und – repräsentativ für den Stadtverkehr – an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage untersucht. Diese beiden Fahrsituationen bestimmen zu einem hohen Anteil die Qualität des Verkehrsablaufs. Daneben gibt es jedoch eine Reihe weiterer relevanter Fahrsituationen, die auf die Kapazität des Gesamtsystems einen signifikanten Einfluss haben können:

1. Außerorts sind dies an den Knotenpunkten der Fernstraßen die Einfädel-, Ausfädel- und Verflechtungsmanöver. In diesem Zusammenhang sind einerseits die technischen Lösungen, die sich bereits heute mit Assistenzfunktionen wie den Einfädelungsassistenten abzeichnen, in ihrer weiteren Entwicklung insbesondere in Hinsicht auf die Möglichkeiten der maschinellen Kooperation vorauszudenken. Andererseits sind Lösungsansätze für die baulichen und regulatorischen Anpassungen der Verkehrsanlagen zu entwickeln.

So erscheint beispielsweise ein Szenario interessant, in dem der autonome Verkehr zwischen den Anschlussstellen der Autobahnen auf separaten Fahrstreifen geführt und

im Knotenpunktbereich die Separierung aufgehoben wird. Im Knotenpunktbereich treten damit autonome und von Menschen gesteuerte Fahrzeuge auf allen Fahrstreifen auf und können jeweils alle Fahrmanöver (autonom, hoch unterstützt oder durch Menschen gesteuert) bei einer möglicherweise vorgegebenen niedrigen Geschwindigkeit durchführen.

2. Innerorts werden insbesondere noch Fragen des Einflusses der sogenannten bedingten Verträglichkeit zu klären sein. Bedingte Verträglichkeit tritt dann auf, wenn sich kreuzende Verkehrsströme an Lichtsignalanlagen gleichzeitig freigegeben werden und Vorfahrtsregeln eingehalten werden müssen. Dies ist z. B. der Fall bei rechts- oder linksabbiegenden Fahrzeugströmen, die dem parallel geführten Fußgänger- und Radverkehr Vorrang einräumen müssen. Verschiedenste Lösungsansätze könnten hierfür interessant sein und sollten einer genaueren Überprüfung unterzogen werden. So könnte man alle Fahrstreifen der autonomen Fahrzeuge gleichzeitig in einer eigenen Phase freigeben – die Fahrmanöver der feindlichen Ströme im Knotenpunktbereich würden von den autonomen Fahrzeugen selbstständig ausgehandelt werden. Alle anderen Verkehrsteilnehmer würden mit der bereits bestehenden Signalisierung behandelt werden. Eine andere Lösungsmöglichkeit wäre die Berücksichtigung der Radfahrer und Fußgänger in einer eigenen Phase mit „Rundumgrün“ bei gleichzeitiger Vermeidung von bedingt verträglichen Kfz-Strömen durch eine geeignete Phasenstruktur.

### 16.4.3 Kooperation

Für Szenarien wie das zuletzt angesprochene des sich selbst organisierenden kreuzenden Verkehrs benötigen autonome Fahrzeuge die Fähigkeit der Kommunikation untereinander und mit der Infrastruktur. Die Antizipation von Manövern von vorausfahrenden Fahrzeugen und die davon abhängenden Reaktionen in der darauffolgenden Kolonne wirken sich auf komfortable und damit akzeptable Beschleunigungswerte und ein komfortables Fahrgefühl aus. Deshalb wird den bereits heute entwickelten Technologien zur Kommunikation und Kooperation bei der Entwicklung des autonomen Fahrens eine wichtige Rolle zukommen.

---

## Literatur

1. Brilon, W. ; Regler, M., Geistefeldt, J (2005): Zufallscharakter der Kapazität von Autobahnen und praktische Konsequenzen. Straßenverkehrstechnik, Heft 3 (Teil 1) und Heft 4 (Teil 2)
2. Friedrich, B.; Kemper, C. (2006): Akzeptanz von Harmonisierungsmaßnahmen im Zuge von Verkehrsbeeinflussungsanlagen. Schlussbericht für die Niedersächsische Landesbehörde für Straßenbau und Verkehr, November 2006, Hannover
3. FGSV – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2001): Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS), S. 3–19

4. FGSV – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2014): Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) – Entwurf der Neufassung
5. Greenshields, B.D. (1935): A study of highway capacity. Proceedings Highway Research Record, Washington Volume 14, pp. 448–477
6. Hall, F. L.; Agyemang-Duah, K. (1991): Freeway capacity drop and the definition of capacity. Transportation Research Record 1320, TRB, National Research Council, Washington D.C.
7. Janiszewski, H.; Jagow, J.; Burmann, M. (2005): Straßenverkehrsrecht. Beck Juristischer Verlag, München
8. Koshi, M.; Iwasaki, M.; Ohkura, I. (1981): Some findings and an overview on vehicular flow characteristics. Proc. 8<sup>th</sup> Int. Symposium on Transportation and Traffic Theory, Ed. Hurdle, Hauer, Steward, Toronto
9. May, A.D.; Keller, H. (1968): Evaluation of single- and two-regime traffic flow models. Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, 1968, Heft 86, S. 37–47
10. Ponzlet, M. (1996): Dynamik der Leistungsfähigkeiten von Autobahnen, Heft 16 der Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrswesen der Ruhr-Universität Bochum
11. Wagner, P. (2014 b): Private Mitteilung

---

# Sicherheitspotenzial automatisierter Fahrzeuge: 17 Erkenntnisse aus der Unfallforschung

Thomas Winkle

## Inhaltsverzeichnis

<b>17.1 Einleitung</b> .....	352
17.1.1 Motivation .....	352
17.1.2 Kategorisierungen von Automatisierungsgraden der Fahrzeugführung .....	353
<b>17.2 Unfalldatensammlungen zur Darstellung von Sicherheitspotenzialen</b> .....	354
17.2.1 Amtliche Straßenverkehrsunfallstatistik in Deutschland .....	354
17.2.2 German In-Depth Accident Study (GIDAS) .....	355
17.2.3 Straßenverkehrsunfallstatistik in den USA .....	355
17.2.4 Verkehrsunfalldaten in Asien am Beispiel China und Indien .....	356
17.2.5 Internationale Sammlung von Verkehrsunfalldaten .....	356
17.2.6 Unfalldatensammlungen der Automobilhersteller .....	356
17.2.7 Unfalldaten des Gesamtverbands der Deutschen Versicherungswirtschaft .....	357
17.2.8 Unfalldatensammlungen von Verbraucherverbänden (ADAC) .....	358
<b>17.3 Grundlagen zur Unfalldatenauswertung</b> .....	358
17.3.1 Erhebungstiefe versus Fallzahlen .....	358
17.3.2 Aussagekraft von Wirkfeldern im Vergleich zu Effektivfeldern .....	359
17.3.3 Sicherheitspotenzial in Abhängigkeit von Automatisierungs- und Wirkungsgrad .....	359
<b>17.4 Aussagekraft möglicher Prognosen auf der Basis von Unfalldaten</b> .....	360
17.4.1 A-posteriori-Analysen von Unfalldaten zu „driver only“/„no automation“ .....	361
17.4.2 A-priori-Prognosen zu assistiertem und teilautomatisiertem Fahren .....	362
17.4.3 Sicherheitspotenzial von hoch- und vollautomatisiertem Fahren .....	366

---

T. Winkle (✉)

Technische Universität München – TUM, Maschinenwesen, Lehrstuhl für Ergonomie, Deutschland  
winkle@carforensic.com

<b>17.5 Sicherheitspotenzial versus Risiken zunehmender Automatisierung</b> .....	368
17.5.1 Menschliche und technische Fehler bei Vollautomatisierung .....	368
17.5.2 Sicherheitspotenzial – Leistungsfähigkeit von Mensch und Maschine .....	369
17.5.3 Sicherheitspotenzial vollautomatisierter Fahrzeuge bei unabwendbaren Ereignissen .....	372
<b>17.6 Fazit und Ausblick</b> .....	372
<b>Literatur</b> .....	374

---

## 17.1 Einleitung

Die fortschreitende Automatisierung von Fahrzeugen verspricht neue Möglichkeiten, die zukünftigen gesellschaftlichen Anforderungen an die Mobilität besser zu erfüllen. In Teilbereichen werden neue erweiterte Konzepte für die Interaktion mit Maschinen [1] entstehen. Voraussetzung dafür ist die technische Weiterentwicklung von Assistenzsystemen mit leistungsfähigeren Sensor- und Informationstechnologien, die eine kontinuierliche Automatisierung von Fahraufgaben in der Fahrzeugführung bis hin zu selbstfahrenden Fahrzeugen möglich machen [2].

### 17.1.1 Motivation

Im Sinne der fortschreitenden Automatisierung bieten Automobilhersteller bereits seit der Jahrtausendwende aktiv lenkende Assistenzsysteme (Active Lane Keeping Assistance Systems – LKAS) in Kombination mit einem Abstandsregeltempomaten für Serienfahrzeuge an. Die kombinierte Funktionalität stand beispielsweise am japanischen Markt für die Rechtslenkerfahrzeuge Nissan Cima (2001) und Honda Inspire (2003) zur Verfügung. Bei der Nutzung beider Assistenten war ein kurzzeitiges teilautomatisiertes Fahren (s. Abschnitt 17.1.2) bis zu 20 Sekunden unter Aufsicht des Fahrers möglich (Testfahrten des Verfassers im Jahr 2003). Seit 2008 verkaufen auch deutsche Hersteller, beginnend mit dem VW Passat CC, aktive Lenkassistenten optional in ausgewählten Modellen [3].

Die Chancen für mehr Verkehrssicherheit steigen durch eine zunehmende Automatisierung von Fahrzeugen. Eine weitere Marktdurchdringung bereits serienmäßiger sicherheits erhöhender Fahrerassistenzsysteme wird zu einer weiteren Reduktion von Verkehrsunfällen führen (S. 361, Abschnitt 17.4.1).

Nach Angaben des Statistischen Bundesamtes verunglückten im Jahr 2013 bei Verkehrsunfällen in Deutschland 3339 Menschen tödlich [4]. Somit verlieren allein im deutschen Straßenverkehr durchschnittlich neun Menschen pro Tag ihr Leben. Darunter sind Unfälle, die künftig durch automatisierte Fahrzeuge vermeidbar wären. Aus Unfalldaten kann ein Sicherheitspotenzial abgeleitet werden. Die in diesem Beitrag genannten Beispiele zeigen Möglichkeiten und Grenzen der Auswertung von Unfalldaten auf. Mit einem Sicher-

heitspotenzial ist hier die prognostizierte Verringerung von Unfallschäden gemeint. Voraussetzungen für die Bestimmung eines konkreten Potenzials sind Grundannahmen zur gesamten Verkehrssituation sowie zum Anteil automatisierter Fahrleistung mit entsprechenden Funktionsgrenzen.

Verkehrsunfallforschung betreiben weltweit unterschiedliche Organisationen. Sie umfasst die Teilbereiche Unfall-Erhebung/-Statistik, Unfall-Rekonstruktion und Unfall-Analyse [5]. Grundlage für die Unfallforschung in Deutschland bildet die von der Polizei in allen Bundesländern geleistete örtliche Unfalluntersuchung. Darüber hinaus betreiben u. a. die VUFO (Verkehrsunfallforschung) der TU Dresden GmbH, die Medizinische Hochschule Hannover, Fahrzeughersteller und Institutionen wie die deutsche Versicherungswirtschaft eine eigene Unfallforschung. Dabei werden Verkehrsunfälle vorrangig direkt vor Ort untersucht, nach bestimmten Merkmalen statistisch erfasst, ausgewertet und bei Bedarf für die Weiterentwicklung zukünftiger Fahrzeugautomatisierung genutzt. Die nachfolgende Ausarbeitung zeigt beispielhaft Möglichkeiten und Grenzen der Erkenntnisse und Prognosen aus Unfalldatensammlungen im Hinblick auf das Sicherheitspotenzial automatisierter Fahrzeuge.

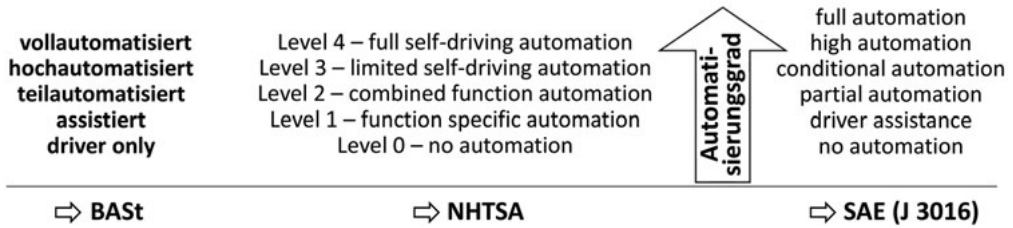
Folgende Fragen werden anhand konkreter Beispiele aus der Unfallforschung erörtert:

- Welche Bedeutung haben Auswertungen und Erkenntnisse aus der Verkehrsunfallforschung für die Einführung automatisierter Fahrzeuge?
- Wie lässt sich das Sicherheitspotenzial durch automatisierte Fahrzeuge nachweisen?

### **17.1.2 Kategorisierungen von Automatisierungsgraden der Fahrzeugführung**

Im Folgenden werden drei Kategorisierungen zur Strukturierung von Automatisierungsgraden (bezogen auf die Fahrzeugführung) vorgestellt, die zur beispielhaften Darstellung der Möglichkeiten und Grenzen von Unfalldatenanalysen dienen. Für die anschließenden Ausführungen ist die 2012 veröffentlichte Einteilung der BAST-Projektgruppe „Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung“ [6] ausreichend. Die verwendeten fünf Grade der Automatisierung beginnen bei der ursprünglich konventionellen Fahrzeugführung mit der Bezeichnung „driver only“ wobei der Fahrer permanent die Längs- und die Querführung ausführt. Weitere Einstufungen setzen sich mit der „Fahrerassistenz“ (assistiert) und der „Teilautomatisierung“ fort, wobei der Fahrer auch letztere noch vollumfänglich und kontinuierlich zu überwachen hat. Abschließend ermöglichen die Stufen „Hochautomatisierung“ und „Vollautomatisierung“ teilweise oder andauernd ein Ausbleiben der menschlichen Überwachung bei der Fahrzeugführung [6]. Nachfolgend hat die amerikanische Behörde NHTSA fünf gleiche Stufen definiert [7]. Darauf aufbauend nahm das International On-Road Automated Vehicle Standards Committee der Society of Automotive Engineers (SAE) im Report J 3016 eine weitere Unterscheidung mit sechs Ebenen vor. Mit dieser Unterteilung arbeiten heute vermehrt Forschungsgruppen. Sie dif-





**Abb. 17.1** Kategorien der Automatisierung nach BAST / NHTSA / SAE

ferenziert fahrerloses Fahren unter begrenzten Einsatzbedingungen sowie die Fähigkeit und Verantwortung einer vollständigen Übernahme von Fahraufgaben bei einer Vollautomatisierung [8], (s. Abb. 17.1).

## 17.2 Unfalldatensammlungen zur Darstellung von Sicherheitspotenzialen

Laut Unfallstatistik ereignet sich ein tödlicher Verkehrsunfall im Durchschnitt

- alle 2,7 Stunden in Deutschland,
- alle 25 Minuten (ca. 34.000 jährlich) in den USA und
- alle 26 Sekunden (mindestens 1.240.000 jährlich) weltweit [4, 9, 10].

Maßnahmen im Straßenbau, in der Gesetzgebung, der Rettungskette, der Notfallmedizin sowie der passiven und aktiven Sicherheit von Fahrzeugen haben die Verletzten- und Unfalldaten seit Anfang der 1970er-Jahre in den westlichen Ländern deutlich gesenkt. Grundlage für diese Erkenntnis bilden großräumige Erhebungen und Analysen von Verkehrsunfällen. Weltweit werden dafür Unfalldaten mit unterschiedlichen Ausrichtungen, Datenmengen und Erhebungstiefen gesammelt. Einige ausgewählte Unfalldatensammlungen, die Aussagen zum Sicherheitspotenzial automatisierter Fahrzeuge ermöglichen, werden im Folgenden mit entsprechenden Vor- und Nachteilen vorgestellt.

### 17.2.1 Amtliche Straßenverkehrsunfallstatistik in Deutschland

Auf Basis von §1 des Straßenverkehrsunfallstatistikgesetzes von 1990 veröffentlicht das Statistische Bundesamt in Wiesbaden monatlich eine Bundesstatistik über Getötete, Verletzte und Sachschäden. Alle Polizeidienststellen sind verpflichtet, aufgenommene Unfälle zu melden und begrenzte Informationen aus den Verkehrsunfallanzeigen über die statistischen Landesämter weiterzuleiten [4].

Regelmäßig werden diese bundesweiten Daten im Internet veröffentlicht. Die polizeilich festgestellte Unfallursache, die im Wesentlichen Fahrfehler der Fahrer bewertet, zeigt das

Potenzial für automatisiertes Fahren (S. 361, Abschnitt 17.4.1.1). Alle dokumentierten Informationen sind übersichtlich in Kategorien unterteilt, wie beispielsweise Straßenart, Alter der Beteiligten bzw. Unfallverursacher und Art der Verkehrsmittel. Nicht verfügbar sind spezifische Dokumentationen zu Unfallrekonstruktion, Verletzten und Fahrzeugdetails.

### **17.2.2 German In-Depth Accident Study (GIDAS)**

Zur detaillierten und gleichzeitig statistisch abgesicherten Auswertung von Verkehrsunfallszenarien sind umfangreiche Daten notwendig. In Deutschland eignet sich hierfür die Datenbank der GIDAS (German In-Depth Accident Study). Sie gilt als eine der umfangreichsten und aussagekräftigsten Unfalldatenbanken der Welt und ist national wie international anerkannt [5, 11]. Die vertieften (In-Depth) Analysen am Unfallort erfolgen nach Auftreten eines Personenschadens fahrzeugübergreifend und werden in Deutschland seit 1973 von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) und seit 1999 auch von der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) unterstützt. Im GIDAS-Projekt werden in den Erhebungsgebieten Hannover (seit 1973) und Dresden (seit 1999) heute jährlich etwa 2000 Unfälle mit bis zu jeweils 3000 codierten Parametern anonymisiert in einer eigenen Unfalldatenbank abgelegt. Jeder dokumentierte Unfall enthält Angaben über die Umwelt (z. B. Wetter, Straßenart, Straßenzustand, Bebauung), die Situation (z. B. Verkehrslage, Konfliktsituation, Unfalltyp, Unfallart), die Fahrzeuge (Typ, Sicherheitsausstattung) sowie Personen- und Verletzungsdaten inklusive einer Unfallskizze mit Rekonstruktion und Bilddaten [5, 11, 12].

Die Vorteile der GIDAS-Daten gründen auf fahrzeugübergreifenden vertieften Analysen am Fahrzeug, an der Unfallstelle und im medizinischen Bereich. Viele Fälle sind für weitere Auswertungen detailliert elektronisch mit der Simulationssoftware PC-Crash der Firma DSD Datentechnik aus Österreich rekonstruiert und simuliert worden [13]. Ein Nachteil besteht darin, dass die Daten nur projektbeteiligten Automobilherstellern und Zulieferern zugänglich sind. Die Aufnahmekriterien schließen nur Unfälle mit Verletzten ein. Obwohl die Erhebung ausschließlich im Umkreis Hannover und Dresden erfolgt, lassen sich die Ergebnisse über eine Hochrechnung (in Fachkreisen: Wichtung bzw. Abgleich mit der amtlichen Unfallstatistik, s. Abschnitt 17.2.1) auf Gesamtdeutschland übertragen.

### **17.2.3 Straßenverkehrsunfallstatistik in den USA**

In den USA dokumentiert die National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) über das Fatality Analysis Reporting System (FARS) seit 1975 jeden tödlichen Verkehrsunfall einheitlich [9]. Weiterhin existiert in den USA seit 1979 das National Automotive Sample System – Crashworthiness Data System (Nass-CDS) [14]. Ähnlich dem deutschen GIDAS-Projekt erheben interdisziplinäre Teams Verkehrsunfälle mit Personen- oder schweren Sachschäden.

Auch in den USA sind weitere Datensammlungen zur vertieften Unfallanalyse verfügbar, jedoch liefern sie im Vergleich zu GIDAS keine verlässliche Unfallrekonstruktion. Beispielsweise ist es nicht möglich, Notbremsfunktionen zu bewerten [11]. Die Unfallrisiken in den USA unterscheiden sich beispielsweise von den deutschen, aufgrund der längeren Fahrdistanzen. Der Rückgang der US-Verkehrsunfalltotenzahl seit 1970 fällt mit ca. 16 Prozent geringer aus als in Deutschland mit ca. 60 Prozent [4, 9].

#### **17.2.4 Verkehrsunfalldaten in Asien am Beispiel China und Indien**

Die Sammlung von Verkehrsunfalldaten in Asien befindet sich in den Anfängen. Die Analysen sind oberflächlich und enthalten keine verlässliche Rekonstruktion. Während in China erste Ansätze für verlässliche Datensammlungen bestehen, wird in Indien nicht einmal die Anzahl der Verkehrsunfalltoten erhoben [11].

#### **17.2.5 Internationale Sammlung von Verkehrsunfalldaten**

Die International Road Traffic and Accident Database (IRTAD) besteht aus einer Sammlung verschiedener nationaler amtlicher Unfallstatistiken. Sie beinhaltet Verkehrsunfälle mit Personenschäden allgemein sowie Getötete nach Alter, Ortslage und Verkehrsbeteiligung und wird von der Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) in Paris gepflegt. Neben den an Deutschland angrenzenden Ländern sind Unfalldaten enthalten von: Australien, Finnland, Griechenland, Großbritannien, Irland, Island, Israel, Italien, Japan, Kanada, Luxemburg, Neuseeland, Norwegen, Portugal, Schweden, Slowenien, Spanien, Südkorea, Ungarn und den USA [10].

Die Daten sind öffentlich im Internet zugänglich und eignen sich besonders für den Vergleich der enthaltenen Länderdaten. Es ist möglich, die Auswirkungen unterschiedlicher Regularien und des kollektiven Fahrverhaltens (beispielsweise Nord versus Süd) zu studieren. Jedoch fehlen vertiefende Informationen zum Unfallhergang. Außerdem unterscheiden sich Erhebungsmethoden und Datenmengen von Land zu Land.

#### **17.2.6 Unfalldatensammlungen der Automobilhersteller**

Um Erkenntnisse zum Unfallgeschehen aktueller Fahrzeuge zu sammeln und die Produktbeobachtungspflicht zu erfüllen, führen heute interdisziplinäre Expertenteams von Automobilherstellern und Zulieferern, gemeinsam mit Krankenhäusern und der Polizei, Unfallanalysen vor Ort durch. Mit diesen Ergebnissen lässt sich die Wirksamkeit aktuell eingeführter Fahrzeugsicherheitssysteme fortlaufend verbessern.

Außerdem dient die Analyse von Unfallereignissen durch den Hersteller der Einhaltung vorgeschriebener Pflichten und der Beobachtung möglicher Produktgefahren, die durch die

Nutzung entstehen können. Nach § 823 des Bürgerlichen Gesetzbuchs (BGB) haftet ein Automobilhersteller für Folgeschäden seiner Produkte, die im Rahmen des bestimmungsgemäßen oder vorhersehbaren Gebrauchs durch den Fahrer oder sonstige Personen durch einen Fehler auftreten. Deshalb muss ein Automobilhersteller Informationen über die Verwendung von Fahrzeugen und innovativen Systemen sammeln und analysieren. Je gefährlicher ein Produkt ist, desto höher sind die Schutzpflichten, das Produkt im Entwicklungsprozess abzusichern und darüber hinaus zu beobachten [15], (s. Kap. 21, 23, 28).

Unter den Automobilherstellern begann Mercedes-Benz bereits Ende der 1960er-Jahre, gemeinsam mit der Polizei im Landkreis Böblingen, Verkehrsunfälle unter Beteiligung von Mercedes-Fahrzeugen zu untersuchen. Zwei Jahre später konnte die Mercedes-Unfallforschung mit Erlaubnis des Ministeriums auf regelmäßige telefonische Informationen und Einsicht in die Unfallakten der Polizei in Baden-Württemberg zurückgreifen. Spätestens seit den 1970er-Jahren begannen auch andere Hersteller wie BMW im größeren Rahmen Kollisionen mit Beteiligung eigener Fahrzeuge zu untersuchen und zu speichern. Volkswagen begann Ende der 1960er-Jahre eine Zusammenarbeit mit dem Haftpflicht-, Unfall-, Kraftversicherer-Verband (HUK-Verband) und seit 1985 mit der Medizinischen Hochschule Hannover MHH (GIDAS-Vorläufer). Auch der Volkswagen-Konzern erhebt seit 1995 eigene Daten [11].

Interdisziplinäre vertiefte Unfallanalysen der Automobilhersteller unter Beteiligung neuer Fahrzeugtypen mit aktueller Sicherheitstechnik und insbesondere die Einbindung von Funktionsentwicklern ermöglichen nachvollziehbare Potenzialaussagen zu Fahrerassistenzsystemen. Allerdings ist die begrenzte Anzahl von ungefähr 100 Fällen pro Jahr, ausschließlich mit Beteiligung der eigenen Fahrzeugmarke, von ihrer statistischen Aussagekraft her nicht mit GIDAS-Daten vergleichbar.

### **17.2.7 Unfalldaten des Gesamtverbands der Deutschen Versicherungswirtschaft**

Der Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (GDV), Nachfolgeorganisation des HUK-Verbandes, verfügt über dokumentierte Informationen des Schadensgeschehens aus Kraftfahrtschäden deutscher Versicherer, wenn auf Basis vertraglicher Zusagen Schadensersatz geleistet wurde. Diese Daten nutzt der GDV beispielsweise zur Einstufung von Versicherungsverträgen oder auch zur Ermittlung des Sicherheitspotenzials von Fahrerassistenzsystemen [16].

Die Unfallforschung der Versicherer hat Zugriff auf alle dem GDV gemeldeten Kraftfahrzeug-Haftpflicht-Schadensfälle. Leider sind die Daten nicht öffentlich zugänglich. Die Durchführung von Unfallanalysen erfolgt nicht direkt vor Ort, und die Unfallaufnahmekriterien sind nicht einheitlich. Außerdem endet das Interesse einer Versicherung an Einzelheiten eines Falles, wenn feststeht, dass sie zahlungspflichtig ist. Daher existieren bei unumstrittenen Fällen nur wenig detaillierte Daten zur Ursache. Bei Allein-Unfällen mit nur einem Beteiligten – wie beispielsweise bei sogenannten Fahrnunfällen,

wenn der Fahrer die Kontrolle über das Fahrzeug verliert – sind meist keine Daten zur Ursache verfügbar [11].

## **17.2.8 Unfalldatensammlungen von Verbraucherverbänden (ADAC)**

Die ADAC-Unfallforschung wird seit 2005 aufgebaut. Sie besteht aus einer Kooperation zwischen der ADAC-Luftrettung und dem ADAC-Technikzentrum. Aus den Rettungsflügen werden bislang jährlich bundesweit Informationen über ca. 2500 schwere Unfälle in der ADAC-Unfalldatenbank gesammelt. Die Unfalldaten stammen von Polizei, Ärzten, Feuerwehren und Kfz-Sachverständigen [17].

ADAC-Unfalldaten beinhalten Informationen zu Verkehrsunfällen mit Schwerverletzten. Darunter sind Luftbilder mit den Endlagen der Fahrzeuge und eine detaillierte medizinische Diagnostik. Auf Aktenbasis besteht die Möglichkeit für ergänzende Einzelauswertungen. Jedoch sind die Daten nicht öffentlich zugänglich. Es erfolgt keine abschließende interdisziplinäre Reflektion mit den jeweiligen unfallaufnehmenden Personen.

---

## **17.3 Grundlagen zur Unfalldatenauswertung**

### **17.3.1 Erhebungstiefe versus Fallzahlen**

Die Aussagekraft von Unfalldaten in Bezug auf Sicherheitspotenziale variiert deutlich, da die Daten unterschiedlich erhoben werden. Sogenannte *In-Depth*-Erhebungen werden meist in Zusammenarbeit mit qualifizierten interdisziplinären Teams durchgeführt. Besonders fundierte Ergebnisse sind durch gemeinsame Einzelfallanalysen von Funktionsentwicklern, Sachverständigen für Unfallanalyse, Medizinern und Verkehrspsychologen erreichbar. Bei einer derartigen Erhebungstiefe bestehen allerdings meist Einschränkungen aufgrund geringerer Fallzahlen, sodass die statistische Aussagekraft oft gering ist.

Auswertungen von Unfalldatenbanken erlauben Rückschlüsse auf Maßnahmen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit. Die detaillierte Unfallanalyse inklusive Unfallrekonstruktion umfasst sowohl die Rückrechnung von Geschwindigkeiten mithilfe der Unfallschleifen als auch die Untersuchung der Unfallentstehung, Betrugsaufklärung sowie Betrachtungen zur Vermeidbarkeit und Biomechanik. Eine darauf basierende Potenzialbewertung zukünftiger Systeme setzt jedoch die umfangreiche Kenntnis vorgegebener Rahmenbedingungen voraus.

Bislang entstanden zukunftsweisende Ideen zur Erhöhung der Fahrzeugsicherheit vor allem durch die Kombination von Unfallanalysen, bestehenden Erfahrungen und umfassenden Forschungstätigkeiten. Unfallforschung ist eine Möglichkeit, die Effizienz bestehender und den Bedarf an neuen automatisierten Fahrzeugfunktionen zur Erhöhung der Sicherheit zu ermitteln. Im Weiteren werden Grundbegriffe zur Unfalldatenauswertung erklärt.

### 17.3.2 Aussagekraft von Wirkfeldern im Vergleich zu Effektivfeldern

Beim Vergleich verschiedener Unfalldatenanalysen ist die Art der Datengewinnung und die Art der Datenverarbeitung zu unterscheiden. Oft werden jedoch unter optimalen Bedingungen angenommene Wirkfelder mit Effektivfeldern unter realen Bedingungen vermischt.

Ein Wirkfeld (*area of action*) umfasst die Unfälle, auf die ein System Einfluss haben kann. Das Wirkfeld kann je nach Präzisierung der Spezifikation eines Systems unterschiedlich ausfallen. Im Ergebnis stellt es eine erste Abschätzung für ein maximal erreichbares Potenzial der betrachteten Automatisierungsstufe dar. Dagegen ist die tatsächlich resultierende Effizienz einer Funktion in der Regel deutlich geringer. Bei der Effizienz handelt es sich um die Wirkung, die ein spezifiziertes System tatsächlich hat. Sie wird entweder am Unfallgeschehen nachgewiesen (*a posteriori*) oder durch eine Simulation vorhergesagt (*a priori*).

Die Ermittlung eines Effektivfeldes (*area of efficiency*) erfordert somit eine genaue Kenntnis über:

- die Systemspezifikation mit entsprechenden Funktionsgrenzen und
- das Verhalten des Fahrers.

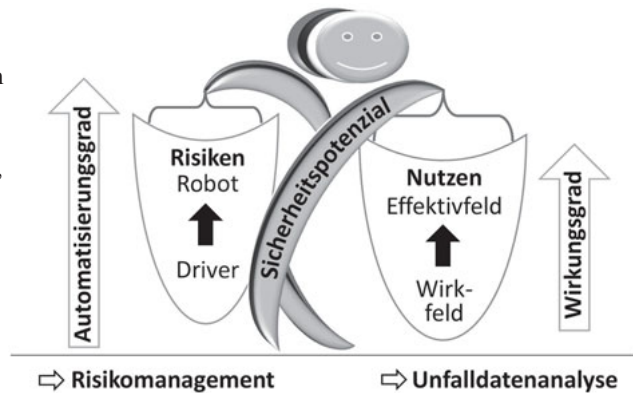
Der Wirkgrad (*degree of efficiency*) hingegen beschreibt den prozentualen Anteil, der die relative Effizienz einer Funktion zum Ausdruck bringt und immer von dem nicht eindeutigen Begriff des Wirkfelds abhängig ist [18]:

$$\text{Wirkgrad} = \frac{\text{Effektivfeld}}{\text{Wirkfeld}} = x [\%] \quad (17.1)$$

### 17.3.3 Sicherheitspotenzial in Abhängigkeit von Automatisierungs- und Wirkungsgrad

Einige Potenzialanalysen zum Sicherheitseinfluss auf der Basis von Unfalldatenbanken betrachten das oben beschriebene, maximal anzunehmende Wirkfeld. Dagegen kommen Wirkgradanalysen der Realität näher, denn sie schätzen ein Effektivfeld für den tatsächlichen Nutzen ein [18]. Der resultierende Sicherheitsnutzen automatisierter Fahrzeuge ergibt sich allerdings erst, nachdem alle Risiken berücksichtigt wurden. Der Nutzen entspricht der Verminderung der Unfallhäufigkeiten bzw. Unfallschwere. Neue Risiken bestehen im Hinblick auf bislang nicht existierende Unfälle, die mit einer zunehmenden Automatisierung entstehen können.

**Abb. 17.2** Verbraucher bewerten das Sicherheitspotenzial subjektiv, indem sie wahrgenommene Risiken und den Nutzen kontextbezogen gegeneinander abwägen. Risiken hängen vom Automatisierungsgrad, der Nutzen vom Wirkungsgrad ab. Unfalldatenanalysen sowie Risikomanagement (s. Kap. 28) ermöglichen Objektivierung (s. Kap. 30) und Optimierung



Die *Theorie der erfinderischen Problemlösung* (TRIZ) definiert die Anforderungen einer idealen Maschine über die Formel für das *Ideale Endresultat* mit einem unbegrenzten Nutzen ohne Kosten und Schäden [19]:

$$\text{Ideales Endresultat} = \frac{\sum \text{Nutzen}}{(\sum \text{Kosten} + \sum \text{Schäden})} = \frac{\infty}{(0+0)} = \infty \quad (17.2)$$

Betrachtet man einerseits den tatsächlichen Gesamtnutzen im Hinblick auf das verbraucherrelevante Sicherheitspotenzial automatisierter Fahrzeuge, so steigt dieser entsprechend dem Wirkungsgrad bis zum maximalen „Effektivfeld“ an (Nachweis über Unfalldatenanalyse und Funktionskenntnis). Andererseits können die Risiken in Abhängigkeit vom Automatisierungsgrad („Driver“ versus „Robot“) ansteigen. Diese reduzieren wiederum den tatsächlichen Nutzen für die Sicherheit (s. Abb. 17.2). Zur Minimierung möglicher Risiken erfolgt vonseiten des Herstellers ein Risikomanagement (s. Kap. 28) unter Einbeziehung von Unfalldaten.

## 17.4 Aussagekraft möglicher Prognosen auf der Basis von Unfalldaten

Die nachfolgende Metaanalyse zeigt an Beispielen Möglichkeiten und Grenzen von Potenzialaussagen auf Basis verschiedener Unfalldaten. Da bislang keine Erfahrungen zur Analyse hoch- bzw. vollautomatisierter Fahrzeuge existieren, werden zunächst Fahrzeugsysteme ohne Automatisierung („driver only“/„no automation“) sowie mit geringeren Automatisierungsgraden bezüglich der Hauptfahraufgaben („assistiert“/„teilautomatisiert“) betrachtet, gliedert nach A-posteriori- und A-priori-Analysen.

Abschnitt 17.4.1 beschreibt Beispiele für A-posteriori-Aussagen zu bislang erfassten Unfalldaten. In der hier genutzten Definition können „aus der Erfahrung gewonnene“ [20] Zahlen direkt für Interpretationen genutzt werden. Im Gegensatz dazu werden die in Ab-

schnitt 17.4.2 definierten A-priori-Prognosen auf der Basis von Unfalldatensammlungen für ein mögliches Potenzial zukünftiger Automatisierungsgrade ausschließlich mithilfe von Annahmen „durch logisches Schließen gewonnen“ [20].

### 17.4.1 A-posteriori-Analysen von Unfalldaten zu „driver only“/ „no automation“

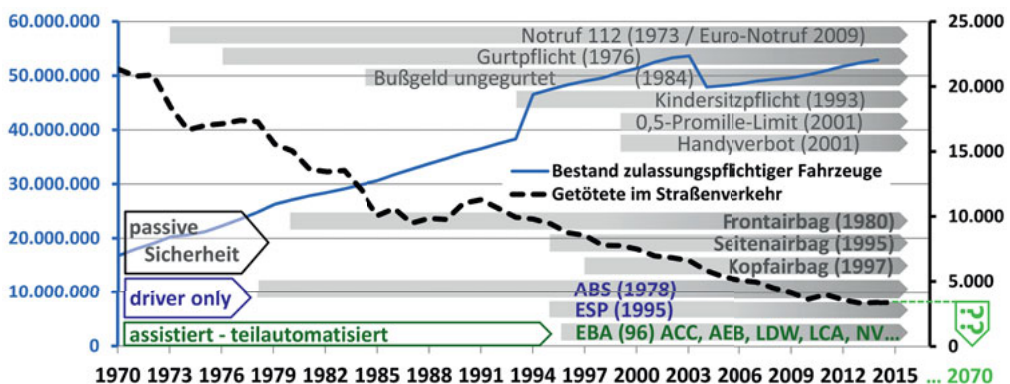
A-posteriori-Analysen von Unfalldaten aus der Vergangenheit und Gegenwart mit konventionell vom Fahrer gesteuerten Fahrzeugen bilden die Grundlage für direkte Erkenntnisse zu Unfallschwerpunkten und Veränderungen im realen Unfallgeschehen. In der Kategorie „driver only“/„no automation“ erfolgen weder Warnungen noch Eingriffe in die Längs- oder Querführung auf der Basis von Umgebungssensoren.

Zur Verdeutlichung dienen ein Beispiel zur Veränderung der Unfalltotenzahlen (s. Abschnitt 17.4.1.1) sowie ein weiteres zum Einfluss der Fahrdynamikregelung Electronic Stability Control – ESC (s. Abschnitt 17.4.1.2).

#### 17.4.1.1 Verkehrsstatistik: Unfalltote versus zulassungspflichtige Fahrzeuge

Anhand der bisher gesammelten Unfalldaten des statistischen Bundesamtes lässt sich beispielsweise das Verhältnis der Verkehrsunfalltoten zu den zugelassenen Fahrzeugen darstellen. Es zeichnet sich in Deutschland – seit der dramatischen Anzahl von 21.332 Verkehrsunfalltoten im Jahr 1970 auf 3368 für das Jahr 2014 – eine fallende Tendenz ab [4].

Die Unfalldaten zeigen: Die Anzahl der Verkehrsunfalltoten ließ sich im Jahr 1970 mit über 21.000 auf jährlich annähernd 3000 – bei gleichzeitiger Zunahme zugelassener Fahrzeuge – senken. Die Ursachen dafür liegen im Bereich unterschiedlicher gesetzlicher, technischer, medizinischer und infrastruktureller Maßnahmen (s. Abb. 17.3). Die Überlagerung aller Sicherheitsvorkehrungen erschwert den Nachweis einzelner Potenziale.



**Abb. 17.3** Rückgang der Verkehrstoten durch sicherheitserhöhende Maßnahmen trotz Zunahme der Anzahl zugelassener Fahrzeuge in Deutschland



#### 17.4.1.2 Studien zur Wirkung von „driver only“/„no automation“

Das seit 1995 eingeführte ESC-System baut technisch auf dem seit 1978 eingeführten ABS (Antiblockiersystem) auf. Es nutzt dessen Raddrehzahlsensoren mit zusätzlichen Sensoren für die Gierraten-, Lenkradwinkel und Querschleunigung. Die Informationen aus diesen Sensoren versuchen das Fahrzeug bei erkanntem Schleudern durch selbstständiges Anbremsen einzelner Räder zu stabilisieren. Durch diese Bremsengriffe kann ESC einen Seitenaufprall in einen weniger verletzungsgefährdenden Frontalaufprall umwandeln. Die Daimler-Unfallforschung ging 2001 davon aus, dass der Anteil von Schleuderunfällen mit verletzten Personen 21 Prozent und bei Unfällen mit tödlichem Ausgang 43 Prozent beträgt [21]. Auf diesen Erkenntnissen aufbauend erfolgten bereits einige Jahre nach der ESC-Einführung Einzelfallanalysen von Fahrdynamikunfällen. Die damaligen Ergebnisse aus Einzelfalluntersuchungen von Experten der Unfallforschungen seitens der Fahrzeughersteller klafften sehr weit auseinander. Auch spätere Potenzialaussagen auf der Basis größerer Datenmengen unterschieden sich. So weisen Wirkfelder aus dem Jahr 2000 einen positiven Einfluss bei schwerwiegenden Schleuderunfällen von bis zu 67 Prozent aus [22]. Andere Studien belegen: Das Elektronische Stabilitätsprogramm (ESC/ESP) in der Kategorie „driver only“ ist nach der Einführung des Sicherheitsgurtes die zweitwirksamste Sicherheitserhöhung für Fahrzeuge [2]. So verringerte sich der Anteil der Fahrunfälle bzw. Schleuderunfälle seit der serienmäßigen Einführung der Fahrdynamikregelung beispielsweise in allen Mercedes-Benz-Pkw im Zeitraum 2002/2003 von 20,7 Prozent auf 12 Prozent [22]. Die hohe Effektivität von ESC ließ sich auch bei anderen Marken, wie beispielsweise Volkswagen, über die Unfallstatistik durch eine geringere Unfallhäufigkeit und die Vermeidung besonders kritischer Unfalltypen nachweisen [23].

Fazit: Bei sicherheitserhöhenden „driver only“-Funktionen mit rascher Marktdurchdringung, wie es insbesondere bei ESC der Fall war, lässt sich bereits heute abhängig von unterschiedlichen Datenquellen und Annahmen ein Sicherheitsgewinn belegen. Insbesondere bei Fahrdynamikregelungen sind Sicherheitsauswirkungen wissenschaftlich fundiert belegbar.

#### 17.4.2 A-priori-Prognosen zu assistiertem und teilautomatisiertem Fahren

A-priori-Prognosen sind an Hypothesen und Schlussfolgerungen geknüpft. So können assistierte und teilautomatisierte Funktionen den Fahrer durch optische, akustische oder haptische Hinweise bzw. kurze Eingriffe mit Warncharakter vor einer drohenden Gefahr bewahren. Voraussetzung für eine erfolgreiche Gefahrenabwehr ist jedoch die Annahme einer rechtzeitigen und der Verkehrssituation angepassten Reaktion des Fahrers.

Aus technischer Sicht ermöglicht diese fortgeschrittene Automatisierungsstufe – mit erweiterter Computer- und Sensortechnik zur Umfeldwahrnehmung – zunehmend leistungsfähigere Assistenzsysteme. Einige der heute angebotenen sicherheitserhöhenden Fahrerassistenzsysteme warnen bei erkannten Gefahren im Längs- oder Querverkehr. Dazu

zählen beispielsweise Kollisions- (EBA – Electronic Brake Assist, ACC mit FCWS – Adaptive Cruise Control mit Forward Collision Warning System), Fahrstreifenwechsel- (LCA – Lane Keep Assist), Fahrstreifenverlassens- (LDW – Lane Departure Warning), Nachtsicht- (NV – Night Vision) oder Kreuzungsassistent. Andere greifen in die Längs- oder Querdynamik ein, wie der elektronische Bremsassistent (EBA) oder eine automatische Notbremse (ANB/AEB Autonomous Emergency Brake) (s. Abb. 17.3).

#### 17.4.2.1 Studie zum Potenzial von Lane Departure Warning

Eine Vorgehensweise, Verkehrsunfälle gemeinsam mit Ärzten, Psychologen und Entwicklungsingenieuren zu analysieren, wurde 2006 am Beispiel eines Lane-Departure-Warning-Systems (LDW) vorgestellt [24]. Die unter Beteiligung des Verfassers, eines Psychologen und eines Funktionsentwicklers erzielten Ergebnisse beruhten auf einer interdisziplinären Forschungsgemeinschaft zwischen einem Automobilhersteller, einer Universitätsklinik und der Polizei mit Unterstützung durch das Bayerische Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr (BStMI).

Derartige interdisziplinäre Ursachen- bzw. Unfallfolgenanalysen umfassen die Betrachtung der technischen, medizinischen und psychologischen Details durch Fachleute des jeweiligen Gebiets mit anschließender gemeinsamer Integration aller Ergebnisse. So werden heute bei einer Verkehrsunfallanalyse vermehrt verkehrspsychologische Unfalldaten erhoben, die das Erleben vor einer Kollision aus der Sicht des Fahrers mithilfe standardisierter Interviews erfassen und bewerten. Der technisch rekonstruierte Unfallhergang wird durch die verkehrspsychologische Sichtweise ergänzt.

In Abstimmung zwischen den Fachteams wurde am Beispiel von Lane Departure Warning dargelegt, welche Voraussetzungen für die Auslegung in der Fahrzeugentwicklung zu treffen sind. Gezielte Fragestellungen aus der technischen Entwicklung filtern die gruppierten Unfälle. Damit lassen sich Aussagen über Unfallvermeidungspotenziale für in der Entwicklung befindliche Systeme treffen. Bedingung ist die Kenntnis der spezifischen technischen Systemgrenzen. Darüber hinaus sind Empfehlungen für weitere Systemerweiterungen möglich [24].

Fazit: Anhand dieser detaillierten Unfallanalysen zeigt sich der Nutzen einer umfassenden Unfalldatenerfassung. Für diese Studie waren Experten für Technik, Medizin und Psychologie eng vernetzt. Diese interdisziplinäre Vorgehensweise liefert zahlreiche zusätzliche Hinweise über Fahrzeugdetails, Unfallstelle, Unfallbeteiligte, Verletzungsmuster und Zeugenaussagen. Die Zusatzinformationen geben Aufschluss über Lenk- und Bremsingriffe sowie Reaktionen unmittelbar vor der Kollision, da bei einem Abkommen von der Fahrbahn menschliche Fehler wie Müdigkeit, Unaufmerksamkeit oder Ablenkung die Hauptursache darstellen. Verschiedene Blickwinkel eines interdisziplinären Teams ermöglichen eine realitätsnahe Rekonstruktion und computergestützte Simulation des Unfallgeschehens. Um daraus repräsentative Ergebnisse zu ermitteln, ist jedoch ein Abgleich mit größeren Unfalldatensammlungen notwendig.

### 17.4.2.2 Interdisziplinäre Wirkgradanalyse zu verfügbaren Fahrerassistenzsystemen

Aufbauend auf den Vorteilen interdisziplinärer Einzelfallbetrachtungen zur Wirkung von Lane Departure Warning im vorangehenden Abschnitt wurde vier Jahre später eine weitere interdisziplinäre Wirkgradanalyse durchgeführt, um das Potenzial bereits in Serie befindlicher sicherheitserhöhender Fahrerassistenzsysteme zu vergleichen. Diese Studie erfolgte anhand einer Stichprobe von rekonstruierten Unfällen ( $n = 100$ ) in enger Absprache mit den jeweiligen Funktionsentwicklern. Die interdisziplinäre Unfalldatenauswertung in Bezug auf die Unfallursache und die situationsabhängige Wirksamkeit der Fahrerassistenzsysteme zur Vermeidung eines Unfalls führte ein Psychologe gemeinsam mit dem Verfasser durch [25]. Zur Untersuchung standen die seit Anfang 2010 angebotenen Seriensysteme Night Vision, Lane Departure Warning, Lane Change Assistant sowie Geschwindigkeits- mit Abstandsregelanlage (Adaptive Cruise Control). Für diesen Wirkgradnachweis erfolgte eine Auswertung von Unfallforschungsdaten, die anhand der Unfallstatistik für Bayern gewichtet wurde. Dabei wurden Realunfälle mit der rekonstruierten Unfallzene abgeglichen und in Bezug auf die Mensch-Maschine-Interaktion der Unfallursache bewertet. Dies erfolgte analog zu den im ADAS Code of Practice für die Entwicklung und sicheren Inverkehrbringung von künftigen Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) mit aktiver Längs- und Querführung beschriebenen Mensch-Maschine-Interaktionen [26]. Nach mehrjähriger Vorbereitung [27, 28] erfolgte 2009 die Veröffentlichung durch die ACEA [29]. Ausschließlich nach Zustimmung aller Entwicklungsexperten der jeweiligen Systeme kam es zu einer positiven Zuordnung eines Unfallvermeidungspotenzials. Ergebnis: Die untersuchten Systeme reduzierten die Unfallschwere deutlich.

Insgesamt konnte ein positiver Nutzen der untersuchten Fahrerassistenzsysteme durch die Vermeidung von Verkehrsunfällen mit einem Rückgang der Gesamtzahl der verletzten Personen um 27 Prozent prognostiziert werden. Dabei würde sich die Anzahl der Verletzten von ursprünglich 126 Fahrern mit 49 Beifahrern auf 94 Fahrer mit 33 Beifahrern reduzieren. Zu beachten ist, dass die Ergebnisse unter der Annahme optimaler Reaktionen hinsichtlich der Mensch-Maschine-Interaktionen stehen, die für eine Aussage zum Wirkgrad durch eine Probandenstudie zu verifizieren wäre. Weiterhin müsste eine 100-prozentige Verbreitung der Systeme gewährleistet sein, die innerhalb der Systemgrenzen fehlerfrei arbeiten.

Die vorgenommene Verletzungseinstufung erfolgte auf Basis der Abbreviated Injury Scale (AIS) [30], wie sie auch die ISO 26262 für die funktionale Sicherheit nutzt [31]. Diese AIS codiert jede Verletzung am menschlichen Körper mit einem Zahlenwert zwischen 1 (leicht verletzt) und 6 (nicht therapierbar). Dabei definiert sich die schwerste Verletzung aller Einzelverletzungen einer Person als MAIS (Maximum AIS). Eine unverletzte Person erhält die Einstufung MAIS 0.

Bei der weiteren Auswertung der Unfallursachen ergab sich ein Anteil der sogenannten Informationsfehler – also Störungen beim Informationszugang und der Informationsaufnahme – von über 60 Prozent. Daraus erklärt sich die entsprechend große Wirkung der warnenden Assistenzsysteme [25].

Fazit: Erstmals wurden in einer interdisziplinären Studie aktuell erhältliche Fahrerassistenzsysteme unter Einbeziehung der jeweils beteiligten Entwickler verglichen. Jeder einzelne Entwickler kennt die spezifisch relevanten Funktionsparameter seines Systems und ermöglicht somit treffsichere Potenzialbewertungen. Allerdings ist anzumerken, dass die gewichtete Stichprobe mit 100 Fällen in der Wirkfeldstudie im Vergleich mit den repräsentativen Unfalldaten aus Bayern zu klein ist, um anhand der gewonnenen Ergebnisse eine statistisch belastbare Aussage zu treffen. Dennoch lässt sich aus den Ergebnissen die Tendenz ableiten, dass diese Fahrerassistenzsysteme erheblich zur Verkehrssicherheit beitragen.

Es sei darauf hingewiesen, dass weitere Möglichkeiten zur Erlangung statistischer Aussagen für die Wirkung von Bremsassistenten und die automatische Notbremsfunktion bestehen. Dazu existieren Bewertungsmethoden zur Prognose des Sicherheitsgewinns, die auf Simulationen elektronischer Unfallrekonstruktionen basieren [32].

### 17.4.2.3 GIDAS-Datenbankanalyse zum Sicherheitspotenzial vernetzter Fahrzeuge

Die folgende GIDAS-Datenbankanalyse (German In-Depth Accident Study) zeigt die Komplexität und Vielfalt verschiedener Annahmen anhand einer größeren Datenmenge. Diese Analyse mit einer aussagefähigeren Stichprobe führte der Verfasser im Jahr 2009 zusammen mit einem Expertenteam im Rahmen des Forschungsprojekts „Sichere Intelligente Mobilität – Testfeld Deutschland“ (simTD) durch. Ziel war es, die Effizienz zukünftiger sicherheitsrelevanter Fahrzeugkommunikationssysteme abzuschätzen. Betrachtet wurden Funktionen für vernetzte Systeme mit direktem Sicherheitseinfluss auf den Straßenverkehr. Als Datengrundlage dienten 13.821 von GIDAS dokumentierte Unfälle mit Personenschaden der Jahre 2001 bis 2008 aus den Großräumen Dresden und Hannover [12]. Für die Hochrechnung auf Gesamtdeutschland wurden die nach einem statistischen Stichprobenplan erhaltenen Daten anhand der amtlichen Unfallstatistik des Statistischen Bundesamtes gewichtet. Die amtliche Statistik enthält alle in Deutschland registrierten Unfälle mit Personenschaden während eines Kalenderjahres. So kam es etwa im Jahr 2007 zu 335.845 Verkehrsunfällen mit Personenschaden [4].

Die zur Auswertung notwendigen Variablen wurden in mehreren Absprachen mit den simTD-Funktionsentwicklern und Unfallexperten der Firmen Audi, BMW, Volkswagen, Daimler und Bosch genau definiert. Die Projektteilnehmer einigten sich im ersten Schritt auf die Betrachtung von 13 sicherheitsrelevanten Warnfunktionen. Im Rahmen mehrerer Workshops entschieden die Projektteilnehmer einstimmig, für diese Betrachtung die relevanten Fahrzeuge wie beispielsweise Pkw, Lkw, Busse, landwirtschaftliche Zugmaschinen, Schienenfahrzeuge (mit Straßenbahnen und Stadtbahnen, jedoch keine Fahrzeuge der Deutschen Bahn) und Motorräder (motorisiertes Zweirad, Trike, Quad ab 125 ccm) zu berücksichtigen. Anschließend wurden sehr aufwendige Wirkfeldbestimmungen auf Basis der umfangreichen GIDAS-Daten durchgeführt. Zunächst erfolgte die Selektion anhand der Unfallvariablen aller für das jeweilige System relevanten Unfälle in Bezug auf das gesamte Unfallgeschehen. Im Ergebnis bewegten sich die Anteile der Wirkfelder aus den einzeln untersuchten Funktionen innerhalb einer großen Bandbreite zwischen 0,2 Prozent

und 24,9 Prozent. Dabei gibt das Wirkfeld lediglich eine Abschätzung der maximalen Effizienz an, die mit sehr großer Sicherheit nicht überschritten wird. Zu beachten ist darüber hinaus, dass einzelne Wirkfelder nicht aufsummiert werden dürfen, da zwischen den Funktionen Wirkfeldüberschneidungen auftreten.

In einer darauf folgenden Wirkgradanalyse wurden aus der oben beschriebenen GIDAS-Wirkfeldanalyse drei Funktionsausprägungen (elektronisches Bremslicht, Querverkehrsassistent, Verkehrszeichenassistent für Stoppschilder) ausgewählt und über eine Simulation reduzierter Stichproben aus Fahrstudien entsprechende Wirkgrade angenommen. Für die durch den Fahrer vermiedenen Unfälle bei einem Querverkehrsassistenten (vgl. [33]) ergab sich beispielsweise eine erhebliche Bandbreite von 9,9 bis 73,3 Prozent. Diese resultiert aus den unterschiedlichen Reaktionszeiten der Fahrer und aus den Bremsintensitäten nach Warnungen. Deshalb wurden drei Reaktionszeiten (0,54/0,72/1,06 Sekunden) und die jeweilige Auftretenswahrscheinlichkeit (36/48/16 Prozent) festgelegt. Angenommen wurde bei erfolgloser Reaktion eine schwache Bremsung mit 50 Prozent und bei erfolgreicher Reaktion mit 100 Prozent des maximalen Bremsdrucks [12].

Fazit: Die aufwendige Vorgehensweise dieser Wirkgradanalyse hatte das Ziel, Potenziale zukünftiger vernetzter sicherheitserhöhender Fahrerassistenzfunktionen mit statistischer Relevanz zu ermitteln und zu bewerten. Die ermittelte Bandbreite von bis zu ca. 70 Prozent schmälert jedoch die Aussagekraft und lässt damit lediglich Tendenzen und Aussichten in Bezug auf vermiedene Unfälle zu. Diese starke Streuung liegt in der Sensitivität der oben beschriebenen Parameter und des bewerteten Warn-Algorithmus begründet, denn die Reaktionszeiten und die Bremsintensitäten der Fahrer auf Warnungen weichen in der Praxis stark voneinander ab.

### 17.4.3 Sicherheitspotenzial von hoch- und vollautomatisiertem Fahren

Aus technischer Sicht können heute automatisierte Fahrzeuge viele Fahraufgaben im Verkehrsgeschehen unter günstigen Bedingungen selbstständig übernehmen. Während Assistenzsysteme den Fahrer unterstützen, übernimmt komplexe Technik beim hoch- bzw. vollautomatisierten Fahren die Fahraufgaben teilweise oder permanent.

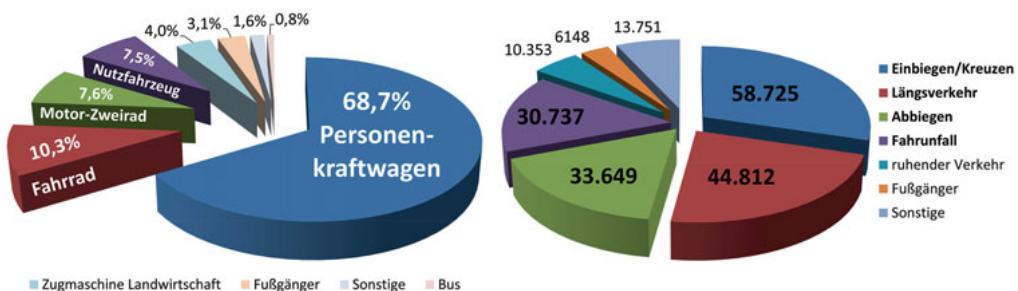
Hoch- und vor allem vollautomatisiertes Fahren soll einer „Vision Zero“ näherkommen: Ziel ist es, möglichst unfallfrei mobil zu sein. Straßen und Verkehrsmittel sollen so sicher gestaltet sein, dass keine Menschen getötet oder schwer verletzt werden. Die Vision der Unfallfreiheit hat ihren Ursprung im Arbeitsschutz und wurde in den 1990er-Jahren in Schweden erstmals auf den Straßenverkehr angewendet. Die EU unterstützte Projekte für selbstfahrende Fahrzeuge wie das Forschungsprojekt „Highly automated vehicles for intelligent transport“ (HAVEit), das von der EU mit 17 Millionen Euro gefördert wurde. Auch Automobilhersteller wie Audi, BMW, Daimler und Volkswagen arbeiten an Visionen zum unfallfreien Fahren. In einem Interview erklärt Thomas Weber, Vorstandsmitglied für Forschung und Entwicklung der Daimler AG:

Unser Weg zum unfallfreien Fahren treibt uns an, die Mobilität auch in Zukunft für alle Verkehrsteilnehmer so sicher wie möglich zu gestalten. [21]

Die Anzahl der Verkehrsunfälle mit Personenschaden und einem Pkw als Hauptverursacher ist im ersten Jahrzehnt dieses Jahrhunderts in Deutschland von 266.885 im Jahr 2001 auf 198.175 im Jahr 2010 zurückgegangen. Laut Statistischem Bundesamt (2010) sind Pkw mit einem Anteil von 68,7 Prozent Hauptverursacher von Verkehrsunfällen. Dabei verteilen sich die Unfalltypen im Schwerpunkt auf die Kategorien Einbiegen/Kreuzen (58.725), Längsverkehr (44.812), Abbiegen (33.649) und 30.737 Fahrunfälle [4] (s. Abb. 17.4).

Bislang fehlt es noch an empirischen Belegen für den übergreifenden Sicherheitsgewinn von Fahrzeugen mit höheren Automatisierungsgraden. Eines der ersten umfangreicheren Prognosemodelle der Fahrzeugsicherheits- und Unfallforschung hat Daimler veröffentlicht. Ermittelt wurde dabei das Unfallvermeidungspotenzial automatisierter Fahrzeuge mittels angenommener Einführungs- und Marktdurchdringungsszenarien durch Expertenabschätzungen und Prognosen Dritter zusammen mit GIDAS-Daten. Die Prognose, die eine erste grobe Abschätzung liefern kann, basiert auf einer Vermeidbarkeit von insgesamt 198.175 durch Pkw verursachten Kollisionen im Jahr 2010 (s. Abb. 17.4). Die Annahmen berücksichtigen Veränderungen innerhalb der jeweiligen Unfalltypen (Längsverkehr, ruhender Verkehr, Fußgänger, Einbiegen/Kreuzen, Abbiegen, Fahrunfall). So zeigt sich, dass Fahrunfälle und Unfälle im Längsverkehr bis zum Jahr 2060 durch eine zunehmende Automatisierung um ca. 15 Prozent abnehmen, während Einbiege- und Kreuzungsunfälle mit ca. 10 Prozent anteilig ansteigen [34].

Auf Grundlage dieser Abschätzungen einer zunehmenden Automatisierung wäre eine Unfallreduktion um 10 Prozent bis 2020 erreichbar. In den weiteren Jahren ist eine Reduktion um 19 Prozent bis 2030, um 23 Prozent bis 2040, um 50 Prozent bis 2050, um 71 Prozent bis 2060 und eine annähernd vollständige Vermeidung für das Jahr 2070 erreichbar [34]. Nach dieser Prognose verursacht ein Pkw im Jahr 2070 nahezu keine Unfälle, jedoch kann er schwere Kollisionen erleiden. Anzunehmen ist, dass ein automatisiertes Fahrzeug die eine oder andere Kollision vermeiden kann, die ein Dritter verursacht. Allerdings bleibt bei dieser Betrachtung eine Unfallverursachung durch andere Verkehrsteilnehmer unberücksichtigt. Mögliche technische Fehler (s. Abb. 17.5) bleiben ebenfalls unbeachtet.



**Abb. 17.4** Pkw als Hauptunfallverursacher und Unfalltypen, Quelle: DESTATIS, GIDAS

Hinzu kommt, dass die verwendeten Daten des statistischen Bundesamtes, und vor allem die Aussagekraft aus GIDAS, hauptsächlich auf Crash- und Post-Crash-Aussagen zu Kollisionen mit Verletzten fokussieren (vgl. [35]). Für eine ganzheitliche Evaluierung relevanter Verkehrsszenarien und Unfallschwerpunkte zur aktiven Sicherheit regelkonform fahrender hoch- sowie vollautomatisierter Fahrzeuge empfiehlt der Autor darüber hinaus die Einbeziehung weltweit erhobener Verkehrsunfalldaten – einschließlich der Kollisionen ohne Personenschaden, Beinahekollisionen, Verkehrssimulationen und Wetterdaten. Diese könnten noch mit Informationen von Krankenhäusern und Versicherungen ergänzt werden. Dafür ist eine Verknüpfung gemeinsamer Kriterien aller bekannten Kollisionen mittels international geografisch definierter Verkehrsunfall-, Wetterdaten und zugehöriger Verkehrsflussdaten anzustreben. Beispielsweise liegen für die Bundesstaaten der USA über [www.saferoadmaps.org](http://www.saferoadmaps.org) ortsgebundene Unfallinformationen vor. Ähnlich veröffentlicht die britische Regierung Einzelheiten anhand von [www.data.gov.uk](http://www.data.gov.uk), die wiederum über eine UK Road Accident Map verortet sind. Regionale Unfalldaten in Deutschland können aus polizeilichen IT-Anwendungen – in einigen Bundesländern aus dem Geografischen Lage-, Analyse-, Darstellungs- und Informationssystem (GLADIS), dem Verkehrs-Unfall-Lage-Karten und Analyse-Netzwerk (VULKAN), dem Brandenburgischen Expertensystem für die Analyse und Dokumentation von unfallauffälligen Streckenabschnitten (BASTa), dem Geografischen Polizeilichen Informationssystem für Verkehrsunfälle (GEOPOLIS V) oder der weit verbreiteten Elektronischen Unfalltypensteckkarte (EUSka) [36] – entnommen werden.

Fazit: Für hoch- und vollautomatisiertes Fahren existieren weder verbindliche Funktionsbeschreibungen einer marktreifen Serienlösung noch Aussagen über konkrete Funktionsgrenzen, weshalb für Prognosen zum Sicherheitspotenzial bis dato zahlreiche Annahmen zu treffen sind. Noch fehlen verbindliche Aussagen über Markteinführungen und -verbreitung. So bieten heutige Ansätze zum Sicherheitspotenzial auf der Basis von Unfalldaten lediglich eine beschränkte Aussagekraft. Daher empfiehlt sich die Zusammenführung vertiefter Unfalldatensammlungen (beispielsweise GIDAS) mit allen weltweit verfügbaren Verkehrsunfalldaten, Verkehrssimulationen und den zugehörigen Wetterinformationen.

---

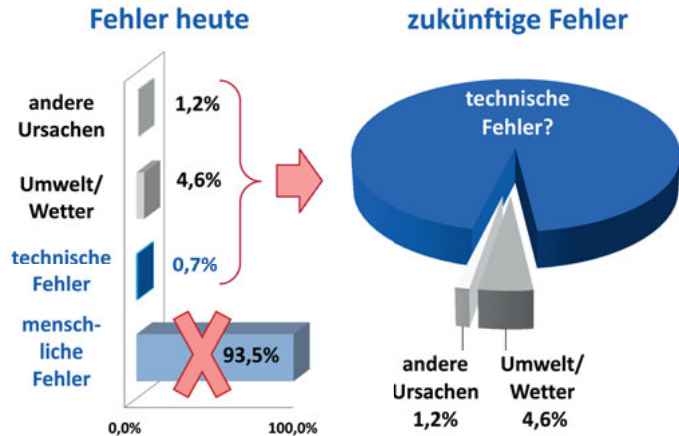
## **17.5 Sicherheitspotenzial versus Risiken zunehmender Automatisierung**

### **17.5.1 Menschliche und technische Fehler bei Vollautomatisierung**

Ausgehend davon, dass die meisten Unfälle durch menschliche Fehler verursacht werden, wäre mit fehlerfreien vollautomatisierten Fahrzeugen die Realisierung der „Vision Zero“ annähernd möglich. Allerdings ist auch bei vollautomatischem Fahren mit technischen Fehlern selbstfahrender Fahrzeuge zu rechnen.

Die linke Seite der Abb. 17.5 zeigt die statistische Unfallursachenverteilung auf Basis der GIDAS-Unfalldatenbank. Auf der Grundlage von Unfalldaten ist das menschliche Fehlverhalten mit einem Anteil von 93,5 Prozent das Hauptrisiko für Verkehrsunfälle.

**Abb.17.5** Heute resultieren Unfälle zu 93,5 Prozent aufgrund menschlicher Fehler. Bei Vollautomatisierung gäbe es keine menschlichen Fehler mehr. Allerdings könnte der Anteil technischer Fehler zukünftig deutlich vergrößert wahrgenommen werden.



Dagegen fallen Einflüsse durch die Fahrumgebung – beispielsweise Fahrbahnbeschaffenheit oder Witterung – mit 4,6 Prozent sowie Mängel am Fahrzeug mit 0,7 Prozent laut Statistik relativ gering aus [37].

Bei Vollautomatisierung entfallen die durch menschliche Fahrfehler verursachten Unfälle. Die Kategorie „technische Fehler“ wird durch neue Risiken des vollautomatischen Fahrens anteilig vergrößert und in der Wahrnehmung der Gesellschaft erhöhte Aufmerksamkeit finden (s. Abb. 17.5).

## 17.5.2 Sicherheitspotenzial – Leistungsfähigkeit von Mensch und Maschine

Die Verkehrssicherheit von Fahrzeugen hängt heute im Wesentlichen von der Leistungsfähigkeit des Menschen mit Unterstützung sicherheitserhöhender Systeme ab. Vollautomatisierte Fahrzeuge werden nur von der maschinellen Leistungsfähigkeit abhängig sein. Je nach Automatisierungsgrad ersetzen technische Systeme Wahrnehmungen, Erfahrungen sowie das Urteils- und Reaktionsvermögen des Menschen. Aus den unterschiedlichen Stärken und Schwächen von Mensch und Maschine ergeben sich das Sicherheitspotenzial und die Risiken einer zunehmenden Automatisierung bei der Fahrzeugführung.

So können Maschinen beispielsweise nicht auf unbekannte Situationen reagieren oder Bewegungen von Kindern interpretieren (s. Kap. 20). Der Mensch hingegen kann unachtsam sein, schlecht Abstände oder Geschwindigkeiten einschätzen und nur in einem begrenzten Sichtfeld wahrnehmen [29].

### 17.5.2.1 Maschinelle versus menschliche Wahrnehmung im Verkehrsgeschehen

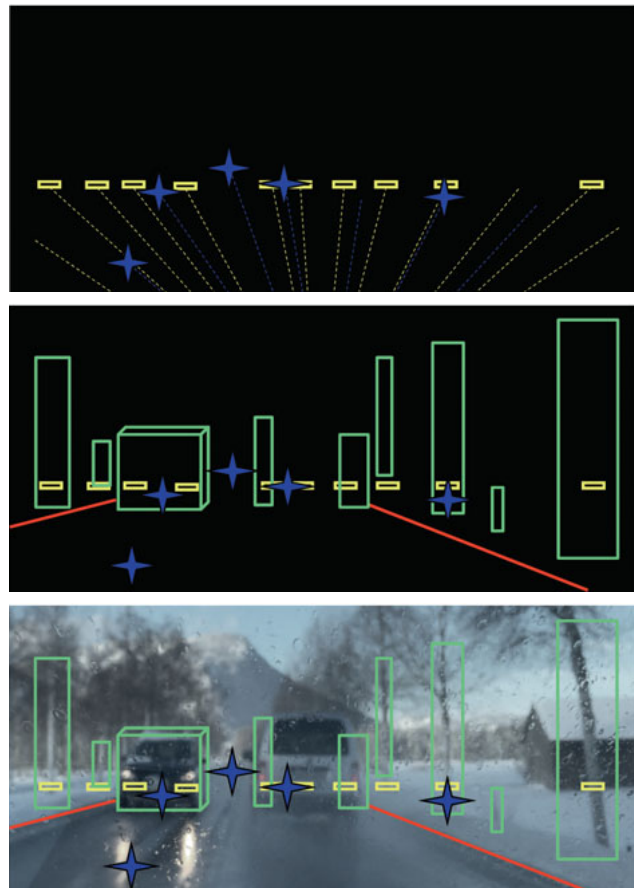
Zur Veranschaulichung der eingeschränkten Leistungsfähigkeit technischer Wahrnehmung im Vergleich zur menschlichen wird im Folgenden ein stark vereinfachtes und unvollständiges Modell derzeit am Markt genutzter Sensortechnologien verwendet. Damit ein Fahr-



zeug Informationen über die Umgebung erhält, sind Sensoren notwendig, die nach ihrem physikalischen Messprinzip klassifiziert werden können. Im Automobilbereich kommen heute vor allem Radar, Lidar, Nah- bzw. Ferninfrarot-, Ultraschallsensoren und Kameras zur Anwendung. In Abb. 17.6 wird im oberen und mittleren Bild die eingeschränkte maschinelle Wahrnehmung einzelner Messprinzipien vereinfacht farblich dargestellt. Demgegenüber steht die eingeblendete menschliche Wahrnehmung zusammen mit allen vorgenannten Messergebnissen im unteren Bild bei erschwerten Licht- und Wetterbedingungen (Sonne, Gegenlicht, nasse Fahrbahn, Spritzwasser, Vereisung, Fahrbahnmarkierungen nur teilweise sichtbar). Bei genauer Betrachtung sieht man, dass es sich beim Radarmesspunkt links unten (blau) um eine fehlerhafte Detektion handelt, die von einer Reflexion auf der Gegenfahrbahn stammt (vgl. [38, 39]).

Zudem verdeutlicht Abb. 17.6, dass das Ergebnis maschineller Wahrnehmung und Interpretation komplexer Verkehrssituationen die Entwicklungsingenieure bislang vor erhebliche technische Herausforderungen stellt. Dies betrifft die Detektion von statischen und dynamischen Objekten, ihre möglichst genaue physikalische Vermessung und die Zuordnung der korrekten semantischen Bedeutung der detektierten Objekte (s. Kap. 20).

**Abb. 17.6** Maschinelle versus menschliche Wahrnehmung (oberes Bild: Radar in Blau mit Lidar in Gelb, mittleres Bild: Ergänzung mit Kamera-Bildverarbeitung in Grün und Rot, unteres Bild: Überlagerung maschineller mit menschlicher Wahrnehmung)

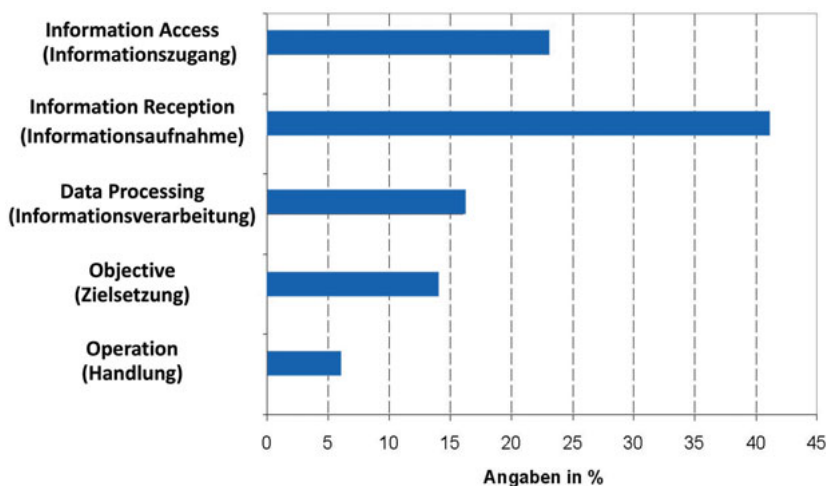


### 17.5.2.2 Menschliche versus maschinelle Leistungsfähigkeit

Für differenzierte Potenzialabschätzungen ist ein Vergleich der Leistungsfähigkeit von Mensch und Maschine erforderlich.

Eine Analyse der Wahrnehmungsprozesskette gibt vertiefende Erkenntnisse über menschliche Fehler im Verkehrsgeschehen. Hierzu wird die Bewertung psychologischer Daten aus Verkehrsunfällen herangezogen [40]. Dabei hat sich im Rahmen der interdisziplinären Unfallanalyse eine Fehlerklassifikation mit fünf Kategorien bewährt. Diese Fünf-Schritt-Methode ist eine praxisbewährte Weiterentwicklung des gemeinsam mit GIDAS entwickelten Unfallursachenschemas ACASS (Accident Causation Analysis with Seven Steps) analog dem Sieben-Schritt-Prinzip nach Jens Rasmussen [41]. Mit dieser Methode ist es möglich, menschliche Fehler zu identifizieren, den Zeitpunkt im Verlauf des Wahrnehmungsprozesses vom Informationszugang bis zur Handlung zu bestimmen und die jeweilige Fehlerart zu bewerten (s. Abb. 17.7). Die zugehörigen Fragen betreffen den Informationszugang (Waren relevante Informationen der Verkehrssituation für den Fahrer zugänglich? War das Sichtfeld frei?), die Informationsaufnahme (Hat der Fahrer die Verkehrssituation genau beobachtet und relevante Informationen erkannt?), die Informationsverarbeitung (Hat der Fahrer die Verkehrssituation aufgrund der verfügbaren Informationen korrekt interpretiert?), die Zielsetzung (Hat der Fahrer eine situativ angemessene Entscheidung getroffen?) und die Handlung (Hat der Fahrer die Entscheidung korrekt umgesetzt?). Im Ergebnis zeigt die Unfallanalyse nach dieser Einstufung beim Menschen vorwiegend Fehlerquellen im Informationszugang und bei der Informationsaufnahme (s. Abb. 17.7, [25]).

Für die maschinelle Wahrnehmung nennt Klaus Dietmayer (s. Kap. 20) drei wesentliche Unsicherheitsdomänen, die der menschlichen Informationsaufnahme und Informationsverarbeitung entsprechen. Es handelt sich um die Zustandsunsicherheit, die Existenzunsicherheit und die Klassenunsicherheit. Alle drei haben direkten Einfluss auf die maschinelle Leistungsfähigkeit. Steigen die Unsicherheiten in diesen Bereichen über ein noch zu definierendes



**Abb. 17.7** Verteilung menschlicher Fehler im Straßenverkehr (vgl. [25])

tolerables Maß an, ist mit Fehlern innerhalb der Führung des automatisierten Fahrzeugs zu rechnen. Zur Voraussagefähigkeit sind bislang lediglich Trendaussagen möglich.

Die heute bekannten Methoden zur Schätzung von Zustands- und Existenzunsicherheiten erlauben zwar eine aktuelle Einschätzung der Leistungsfähigkeit der maschinellen Wahrnehmung, eine Degeneration der Leistungsfähigkeit einzelner Sensoren oder gar ein Ausfall von Komponenten kann aber prinzipbedingt nicht vorhergesagt werden (s. Kap. 20, S. 432).

### **17.5.3 Sicherheitspotenzial vollautomatisierter Fahrzeuge bei unabwendbaren Ereignissen**

Zusätzlich sind für Betrachtungen des Sicherheitspotenzials vollautomatisierter Fahrzeuge die fortbestehenden Risiken im Bereich komplexer Verkehrssituationen bzw. heute bekannter unabwendbarer Ereignisse zu berücksichtigen. So treten Unfallgefahren an unübersichtlichen Knotenpunkten oder hinter Sichtverdeckungen auf. Bei einer Einzelfalluntersuchung im Rahmen einer Dissertation an der Universität Regensburg wurden Sichtverdeckungen bei einem Anteil von ca. 19 Prozent aller Fälle als Mitursache identifiziert [40]. Beispiele hierfür sind Bäume, Sträucher, Hecken oder hohes Gras. Von einer Verdeckung spricht man auch, wenn beispielsweise ein Kind im Stadtverkehr plötzlich und unerwartet zwischen parkenden Fahrzeugen oder aus einer Hofeinfahrt vor das Fahrzeug läuft.

Bei der vollautomatisierten Fahrzeugführung ist in derartigen Verkehrssituationen eine Prädiktion des aktuellen Bewegungsverhaltens von Objekten in die Zukunft erforderlich. Hier stößt auch die Technik bislang an ihre Grenzen.

Aufgrund der Vielzahl der möglichen und nicht voraussehbaren Ereignisse, insbesondere reaktiver Aktionen anderer Verkehrsteilnehmer, steigen die Unsicherheiten der Situationsprädiktion nach etwa 2 s–3 s so stark an, dass hierauf keine verlässliche Trajektorienplanung mehr möglich ist. (s. Kap. 20, S. 434)

---

## **17.6 Fazit und Ausblick**

Erkenntnisse aus der Verkehrsunfallforschung bestätigen: Menschliches Versagen ist die Hauptursache von Verkehrsunfällen. Dabei treten insbesondere Fehler im Ablauf des Wahrnehmungsprozesses, bei der Informationsaufnahme und beim Informationszugang auf.

Um aus Unfalldaten das Sicherheitspotenzial hoch- und vollautomatisierter Fahrzeuge abzuschätzen, ist ein differenzierter Vergleich der Gesamtleistungsfähigkeit von Menschen und Maschinen erforderlich. Dieser wird jedoch erst möglich, wenn exakte Kenntnisse über die Funktionsausprägung mit den technischen Grenzen geplanter Serienentwicklungen verfügbar sind.

Statistisch abgesicherte Expertenauswertungen belegen bereits heute das Potenzial zukünftiger sicherheitsunterstützender Fahrzeug- und Fahrerassistenzsysteme. So kann be-

reits vor Entwicklungsbeginn der mögliche Nutzen abgeschätzt werden, und der Automobilhersteller kommt mit der Analyse und Auswertung von Verkehrsunfällen zusätzlich seiner Produktbeobachtungspflicht nach.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse der Analyse von Verkehrsunfällen heute nachweisbar, dass die Automatisierungen von Fahrfunktionen in den Kategorien „driver only“ über „assistiert“ bis zum „teilautomatisierten“ Fahren als Schlüsseltechnologie zur Milderung der Folgen menschlichen Versagens beitragen.

Prognosen zum Sicherheitspotenzial „hoch- und vollautomatisierter“ Fahrzeuge auf der Basis von Verkehrsunfalldaten liefern lediglich Ergebnisse, die auf zahlreichen Annahmen basieren. Dies gilt in besonderer Weise, wenn sie permanent alle Fahraufgaben im Straßenverkehr ohne Fahrerüberwachung übernehmen. Einen Ausblick auf den möglichen Sicherheitseinfluss vollautomatisierter Fahrzeuge gibt eine erste Abschätzung der Daimler-Unfallforschung, die auf mehreren Expertenannahmen basiert. Gemäß dieser Abschätzung lassen sich die Unfallzahlen bis zum Jahr 2070 – unter Annahme einer erfolgreichen Marktdurchdringung – annähernd vollständig reduzieren. Allerdings wurden ausschließlich durch Pkw ausgelöste Unfälle unter Ausschluss physikalischer Grenzen bzw. möglicher technischer Mängel betrachtet. Somit basiert diese Abschätzung auf einigen Annahmen, die zukünftig noch im Detail zu verfeinern und zu validieren sind.

Technische Herausforderungen erschweren derzeit valide Prognosen zum Sicherheitspotenzial. Insbesondere die Wahrnehmung und Interpretation komplexer Verkehrssituationen stellt Entwicklungsingenieure bislang vor erhebliche technische Herausforderungen. Weiterhin wird die Leistungsfähigkeit des Menschen häufig unterschätzt. Fahrerassistenzsysteme gleichen im Wesentlichen anhand von Erkenntnissen aus Verkehrsunfallanalysen die Schwächen menschlicher Fähigkeiten aus. Sie können die Sicherheit in Routinefahrsituationen mit menschlicher Überwachung erhöhen. Dagegen müssen fahrerlose Fahrzeuge zunächst die Fahrfähigkeiten des aufmerksamen menschlichen Fahrers erreichen, um anschließend die Fähigkeiten des Menschen für eine weitere Reduktion der Verkehrsunfallzahlen zu übertreffen. Erst wenn diese technischen Hürden genommen sind, ist eine großflächige Einführung marktreifer vollautomatischer Fahrzeuge zu erwarten.

Zusammengefasst beschränken folgende Aspekte die Aussagefähigkeit der Prognosen zum Sicherheitspotenzial der Automatisierung von „driver only“- bis zu vollautomatisierten Fahrzeugen:

- Bislang ausgewiesene Sicherheitspotenziale von „driver only“ bis hin zu fortgeschrittenen Automatisierungsgraden sind je nach Herkunft der verwendeten Daten mit Bedacht zu beurteilen und zu verwerten. Die Aussagekraft und Prognosefähigkeit des Datenmaterials sind jeweils abhängig von der Auswahl und Bewertung der Merkmale.
- Unterschiedliche Herangehensweisen in Potenzialbewertungen sind unter fachkundiger Betrachtung zu vergleichen. Ein Wirkfeld zeigt im Idealfall eine maximal mögliche Vermeidbarkeit von Verkehrsunfällen. Im Gegensatz dazu steht der tatsächlich ausweisbare Nutzen, der deutlich geringer ausfällt.

- Die Aussagefähigkeit von Auswertungsmethoden kann stark variieren: Es macht einen Unterschied, ob ein erfahrener Unfallrekonstrukteur oder -analytiker mit allen Beteiligten sämtlicher Entwicklungsprozesse aktueller Systeme – in Absprache mit Mediziner\*innen und Psycholog\*innen – eingebunden ist oder nicht. Auf der Basis dieser vielschichtigen Hintergrundinformationen erhält er einen Gesamtüberblick über ein komplexes Unfallereignis und kann genauer rekonstruieren bzw. analysieren als ein Kollege ohne dieses Detailwissen.
- Oft entstehen innerhalb einzelner und zwischen mehreren Potenzialbetrachtungen viele Wirkfeldüberschneidungen, die das Gesamtwirkfeld reduzieren.
- Für weiterführende Erkenntnisse sollten vertiefende Erhebungen schwerer Verkehrsunfälle (beispielsweise GIDAS) mit weltweit verfügbaren Verkehrsunfalldaten, Wetterdaten und idealerweise mit Verkehrssimulationen (s. Kap. 15, 16) zusammengeführt werden. Resultierende Ergebnisse dienen der Entwicklung, Auslegung und dem Test sicherer automatisierter Fahrzeuge (s. Kap. 28).
- Ab dem Grad der Hochautomatisierung entfällt – zumindest zeitweise – die Beherrschbarkeit durch die am Unfallgeschehen beteiligten Personen. Damit gewinnen Maßnahmen zur Risikoreduktion für die Gewährleistung der funktionalen Sicherheit bezüglich der elektrisch/elektronischen Komponenten an Relevanz.
- Der Wirkgrad vollautomatischer Fahrzeuge lässt sich derzeit nicht genau quantifizieren, da zahlreiche technische und marktspezifische Faktoren im Detail noch unbekannt sind.
- Anzunehmen ist, dass sich einzelne Unfallszenarien selbst durch Steigerung des Automatisierungsgrades bis hin zur Vollautomatisierung trotz regelkonformer Fahrweise nicht ausschließen lassen. Dies trifft beispielsweise bei fahrphysikalischen Grenzen oder zeitkritischen Situationen zu, wie dem plötzlich vor das Fahrzeug laufenden Kind.

Das Sicherheitspotenzial vollautomatischer Fahrzeuge basiert letztlich auch auf der Annahme, dass über 90 Prozent heutiger Verkehrsunfälle auf menschliches Versagen zurückzuführen sind. Auch wenn die Technik fahrerloser Fahrzeuge niemals eine 100-prozentige Perfektion erreichen wird und dadurch wenige neue bislang unbekannte Unfallkonstellationen entstehen können, scheint die Vision von flächendeckend fahrerlosen Fahrzeugen im Straßenverkehr einen gesellschaftlich erstrebenswerten Nutzen zu versprechen. Deshalb sind Forschungsaktivitäten mit weltweit beteiligten interdisziplinären Experten, die das Thema der Fahrzeugautomatisierung vorantreiben, zu stärken.

---

## Literatur

1. Bengler K, Flemisch F (2011) Von H-Mode zur kooperativen Fahrzeugführung – Grundlegende Ergonomische Fragestellungen, 5. Darmstädter Kolloquium: kooperativ oder autonom? Darmstadt
2. Bengler K, Dietmayer K, Färber B, Maurer M, Stiller C, Winner H (2014) Three Decades of Driver Assistance Systems: Review and Future Perspectives, IEEE Intelligent Transportation System Magazine, ISSN 1939-1390, Volume 6, Issue 4, S. 6–22

3. Katzourakis D, Olsson C, Lazic N, Lidberg M (2013) Driver Steering Override Strategies for Steering based Active Safety Systems, In: FAST-zero 2013 – Second International Symposium on Future Active Safety Technology toward zero-traffic-accident, Nagoya
4. Statistisches Bundesamt (2014) Destatis, Zahlen und Fakten, Wiesbaden
5. Kramer F (2013) Integrale Sicherheit von Kraftfahrzeugen: Biomechanik – Simulation – Sicherheit im Entwicklungsprozess, Vieweg Teubner, Wiesbaden
6. Gasser T, Arzt C, Ayoubi M, Bartels A, Bürkle L, Eier J, Flemisch F, Häcker D, Hesse T, Huber W, Lotz C, Maurer M, Ruth-Schumacher S, Schwarz J, Vogt W (2012) Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung, Wirtschaftsverlag NW, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen F83, Bergisch Gladbach
7. National Highway Traffic Safety Administration – NHTSA (2013) Preliminary statement of policy concerning automated vehicles, Washington DC
8. Society of Automotive Engineers – SAE International (2014) Levels of driving automation for on road vehicles, Warrendale PA
9. National Highway Traffic Safety Administration NHTSA (2014) Fatality Analysis Reporting System (FARS), Washington
10. Amoros E, Brosnan M, Wegman F, Bos N, Perez C, Segui M, Heredero R, Noble B, Kilbey P, Feypell V, Cryer C (2009) Reporting on Serious Road Traffic Casualties, International Traffic Safety Data and Analysis Group – IRTAD, Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), International Transport Forum, Paris
11. Zobel R, Winkle T (2014) Persönliche Kommunikation, Wolfsburg u. Braunschweig
12. Schubert A, Erbsmehl C (2013) Simulation realer Verkehrsunfälle zur Bestimmung des Nutzens für ausgewählte simTD-Anwendungsfälle auf Basis der GIDAS-Wirkfeldanalyse – zur Darstellung eines maximal anzunehmenden Wirkfeldes – von Winkle T, Mönnich J, Bakker J, Kohsiek A (2009), Forschungsbericht simTD, gefördert von den Ministerien BMWi, BMBF, BMVBS, Berlin
13. Burg H, Moser A (2009) Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion, 2. Auflage, Vieweg Teubner, Wiesbaden
14. O’day J (1986) Remarks about U. S. Accident Investigation Programs FARS und NASS. In: Bierau D, O’day J, Grush E, Erfassung und Auswertung von Straßenverkehrsunfalldaten, Forschungsvereinigung Automobiltechnik, Schriftenreihe 54, S. 29–31, Frankfurt (Main)
15. Matthaei R, Reschka A, Rieken J, Dierkes F, Ulbrich S, Winkle T, Maurer M (2015) Autonomes Fahren, In: Winner H, Hakuli S, Lotz F, Singer C (Hrsg.) Handbuch Fahrerassistenzsysteme, 3. Auflage, S. 1146–1168, Vieweg Teubner, Wiesbaden
16. Hummel T, Kühn M, Bende J, Lang A (2011) Fahrerassistenzsysteme – Ermittlung des Sicherheitspotenzials auf Basis des Schadensgeschehens der Deutschen Versicherer, Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. Forschungsbericht FS 03, Berlin
17. Unger T (2013) ADAC Unfallforschung – Fallverteilung, Datenerhebung, Auswertungen, Landsberg/Lech
18. Schittenhelm H, Bakker J, Bürkle H, Frank P, Scheerer J (2008) Methods for analyzing the efficiency of primary safety measures based on real life accident data, ESAR 2008, Hannover
19. Koltze K, Souchkov V (2011) Systematische Innovation: TRIZ-Anwendung in der Produkt- und Prozessentwicklung, Hanser, München, Wien
20. Duden (2014) Die deutsche Rechtschreibung, Bibliographisches Institut, 23. Auflage, Mannheim
21. Daimler AG Communications (2011) Der Weg zum unfallfreien Fahren, COM/M 5836/1635/00/0511, Stuttgart
22. Langwieder K, Gwehenberger J, Hummel T (2003) Benefit Potential of ESP in Real Accident Situations involving Cars and Trucks, 18. International ESV-Conference, Nagoya
23. Zobel R, Friedrich H, Becker H (2000) Accident Research with Regard to Crash Avoidance, Transactions/Vehicle Safety 2000 Conference, London

24. Hörauf U, Buschardt B, Donner E, Graab B, Winkle T (2006) Analyse von Verkehrsunfällen mit FAS-Potenzialeinschätzung am Beispiel des FAS Lane Departure Warning. In Tagung Aktive Sicherheit 2006, Technische Universität München, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, München
25. Chiellino U, Winkle T, Graab B, Ernsberger A, Donner E, Nerlich M (2010) Was können Fahrerassistenzsysteme im Unfallgeschehen leisten? In: Zeitschrift für Verkehrssicherheit 3/2010, TÜV Media GmbH, S. 131–137, Köln
26. Donner E, Winkle T, Walz R, Schwarz J (2007) RESPONSE 3 – Code of Practice für die Entwicklung, Validierung und Markteinführung von Fahrerassistenzsystemen (ADAS). In Technischer Kongress 2007, Verband der Automobilindustrie (VDA), S. 231–241, Sindelfingen
27. Becker S, Schollinski H-L, Schwarz J, Winkle T (2003) Introduction of RESPONSE 2, EU Projekt, In: Maurer M, Stiller C (Hrsg.), 2. Workshop Fahrerassistenzsysteme – FAS2003, Leinsweiler
28. Becker S, Mihm J, Brockmann M, Donner E, Schollinski H-L, Winkle T, Jung C, Dilger E, Kanz C, Schwarz J, Bastiansen E, Andreone L, Bianco E, Frost F, Risch A, Eegher van G, Servel A, Jarri P, Janssen W (2004) Steps towards a Code of Practice for the Development and Evaluation of ADAS, RESPONSE 2, European Commission Public Report, Project Deliverable D3, Brüssel
29. Knapp A, Neumann M, Brockmann M, Walz R, Winkle T (2009) Code of Practice for the Design and Evaluation of ADAS, Preventive and Active Safety Applications, eSafety for road and air transport, European Commission Project, Brüssel
30. Association for the Advancement of Automotive Medicine (2005) The Abbreviated Injury Scale (AIS) Update 2008, Barrington IL
31. International Organization for Standardization (ISO), ISO 26262-3 (2011): Road Vehicles – Functional safety
32. Busch S (2005) Entwicklung einer Bewertungsmethodik zur Prognose des Sicherheitsgewinns ausgewählter Fahrerassistenzsysteme, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 588, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf
33. Klanner F (2008) Entwicklung eines kommunikationsbasierten Querverkehrsassistenten im Fahrzeug, Dissertation, Darmstadt
34. Unselt T, Schöneburg R, Bakker J (2013) Insassen und Partnerschutz unter den Rahmenbedingungen der Einführung autonomer Fahrzeugsysteme, In: 29. VDI/VW-Gemeinschaftstagung „Automotive Security“, Wolfsburg
35. Schubert A, Erbsmehl C, Hannawald L (2012) Standardised Pre-Crash-Szenarios in digital format on the basis of the VUFO Simulation, Dresden
36. Dick R (2011) Die Polizeilichen- Online- Informationssysteme in der Bundesrepublik Deutschland, Books on Demand GmbH, Norderstedt
37. GIDAS – German In-Depth Accident Study – Unfalldatenbank, Dresden, Hannover
38. Becker S, Brockmann M, Jung C, Mihm J, Schollinski H-L, Schwarz J, Winkle T (2004) ADAS – from Market Introduction Scenarios towards a Code of Practice for Development and Evaluation, Final Report, RESPONSE 2 – European Commission, Public Report, Brüssel
39. Donner E, Schollinski H-L, Winkle T, Jung C, Dilger E, Kanz C, Schwarz J, Bastiansen E, Andreone L, Becker S, Mihm J, Jarri P, Frost F, Janssen W, Baum H, Schulz W, Geissler T, Brockmann M (2004) Methods for Risk-Benefit-Analysis of ADAS: Micro Perspective and macroscopic socioeconomic evaluation, RESPONSE 2, European Commission Public Report, Project Deliverable D2, Brüssel
40. Gründl M (2006) Fehler und Fehlverhalten als Ursache von Verkehrsunfällen und Konsequenzen für das Unfallvermeidungspotenzial und die Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen, Dissertation, Regensburg
41. Rasmussen J (1982) Human errors: a taxonomie for describing human malfunction in industrial installations. Journal of Occupational Accidents 4, S. 311–333, Elsevier Scientific Publishing Company, Philadelphia PA

Heike Flämig

## Inhaltsverzeichnis

<b>18.1 Einleitung</b> .....	378
<b>18.2 Entwicklungsgeschichte fahrerloser und autonomer Transportsysteme</b> .....	379
18.2.1 Fahrerlose Transportsysteme im Innenbereich .....	379
18.2.2 Fahrerlose Transportfahrzeuge im Außenbereich .....	381
18.2.3 Autonome Fahrzeuge für den Straßengütertransport außerhalb von Betriebsgeländen .....	382
18.2.4 Entwicklungen autonomen Fahrens und autonomer Fahrzeuge in den anderen Verkehrsträgern .....	382
18.2.5 Zwischenfazit .....	383
<b>18.3 Anwendungsfälle im Bereich des autonomen Gütertransports</b> .....	384
18.3.1 Exkurs: Automatisierungsgrade des autonomen Gütertransports .....	385
18.3.2 Anwendungsfälle des autonomen Gütertransports .....	385
18.3.3 Autobahnpilot mit Fahrer und freier Navigation .....	386
18.3.4 Vehicle-on-Demand als Autobahnfahrt ohne Fahrer mit freier Navigation .....	387
18.3.5 Vollautomat mit Verfügbarkeitsfahrer – Follow-Me-Fahrzeug .....	389
18.3.6 Valet-Parken – Valet delivery .....	389
<b>18.4 Veränderungen in der Supply Chain durch einen höheren Automatisierungsgrad im Gütertransport</b> .....	390
<b>18.5 Erste einzelwirtschaftliche Einschätzungen von automatisierten Systemen in der Gütertransportkette</b> .....	392

---

H. Flämig (✉)

Technische Universität Hamburg-Harburg, Institut für Verkehrsplanung und Logistik, Deutschland  
flaemig@tu-harburg.de