

Heike Flämig

Inhaltsverzeichnis

18.1 Einleitung	378
18.2 Entwicklungsgeschichte fahrerloser und autonomer Transportsysteme	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
18.3 Anwendungsfälle im Bereich des autonomen Gütertransports	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
18.4 Veränderungen in der Supply Chain durch einen höheren Automatisierungsgrad im Gütertransport	390
18.5 Erste einzelwirtschaftliche Einschätzungen von automatisierten Systemen in der Gütertransportkette	392

H. Flämig (✉)

Technische Universität Hamburg-Harburg, Institut für Verkehrsplanung und Logistik, Deutschland
flaemig@tu-harburg.de

18.6 Erste gesamtwirtschaftliche Einschätzungen von automatisierten Systemen in der Gütertransportkette	393
18.7 Fazit und Ausblick	394
Literatur	397

18.1 Einleitung

Zur Erhöhung von Produktivität, Zuverlässigkeit und Flexibilität der Raumüberwindung nimmt der Automatisierungsgrad der Fahrzeuge sowohl im Bereich der Verkehrsträger als auch im Bereich des innerbetrieblichen Transports kontinuierlich zu. Durch die anwachsende Informationsdichte und Komplexität räumlicher Arbeitsteilung gewinnt die Idee der sich selbststeuernden, dezentralen Einheiten an Bedeutung. Die Konzentration der öffentlichen und wissenschaftlichen Diskussion zum autonomen Fahren mit individuellen Personenkraftwagen vernachlässigt bisher allerdings rund ein Drittel des Verkehrs auf öffentlichen Straßen, nämlich den Wirtschaftsverkehr. Wiederum ein Drittel des Wirtschaftsverkehrs entsteht durch den Transport von Gütern, der notwendig ist, da der Ort der Gütererstellung selten dem Ort der Güternachfrage entspricht. Das Fahren selbst stiftet keinen Mehrwert und ist nur Mittel zum Zweck der Raumüberwindung. Aus diesem Grund wurden bereits in den 1950er-Jahren erste Anwendungen in der innerbetrieblichen Logistik entwickelt, bei denen der Transport ohne Fahrer realisiert werden konnte. Die Entwicklung sogenannter Fahrroboter erfolgte vor allem für spezielle Missionen in gefährlichen oder kaum zugänglichen Gebieten. Automatisierte, fahrerlose und teilweise autonome Fahrzeuge sind also schon seit Längerem für den Transport von Gütern in der Produktion oder in logistischen Systemen im Einsatz.

Ganz grundsätzlich stellt sich die Frage, inwieweit auch im Straßengüterverkehr auf öffentlicher Infrastruktur vollautomatisches Fahren eine sinnvolle Anwendung sein kann. Daran knüpfen sich weitere Fragen an die notwendigen technischen und organisatorischen sowie rechtlichen und sicherheitsbezogenen Voraussetzungen für eine erfolgreiche Umsetzung und sich daraus möglicherweise ergebenden Veränderungen in der Logistik bzw. in Supply Chains und im Güterverkehrssystem.

Das Kapitel nähert sich diesen Fragestellungen zunächst historisch aus der Perspektive der innerbetrieblichen Logistik, da in diesem Zuge die Beweggründe von Unternehmen für die Implementierung von fahrerlosen Transportsystemen gut nachvollziehbar werden und der Erfahrungshintergrund der Unternehmensentscheider offengelegt wird. Anhand von Fallbeispielen aus dem Bereich von Logistik und Güterverkehr werden derzeitige Einsatzfelder aufgezeigt und, soweit bekannt, das für die autonome Fahrt wichtige Navigations- und Sicherheitskonzept sowie die Steuerung beschrieben. Zudem werden aufbauend auf den in Kap. 2 beschriebenen Anwendungsfällen spezifische Anwendungsfälle für den Güterverkehr skizziert. Die sich parallel entwickelnden autonomen Systeme der anderen Verkehrsträger,

beispielsweise Drohnen, zeigen, dass vollkommen neue Geschäftsmodelle im Bereich der Logistik durch autonome Systeme im Entstehen sind. Die zu erwartenden Veränderungen in den logistischen Prozessen sowie die veränderte Rolle der menschlichen Arbeit in den Systemen werden anhand einer generischen Supply Chain diskutiert. Das Kapitel schließt mit Handlungsempfehlungen und der Benennung des weiteren Forschungsbedarfs.

18.2 Entwicklungsgeschichte fahrerloser und autonomer Transportsysteme

Fahrerlose Transportsysteme (FTS) und Fahrerlose Transportfahrzeuge (FTF) kamen erstmals Anfang der 1950er-Jahre in Amerika und rund zehn Jahre später in Deutschland zum Einsatz [1]. Im Vordergrund stand die Optimierung des Materialflusses und die Reduzierung des Personaleinsatzes als logische Konsequenz der sich seit dem frühen 19. Jahrhundert ausbreitenden Ideen zur Erhöhung der Produktivität durch die Verbesserung der Arbeitsabläufe (Taylor), über die Vertaktung der Produktionsstufen (insbesondere geprägt durch das „System vorbestimmter Zeiten“ nach Gilbreth) bis hin zur kontinuierlichen Fließbandfertigung (Ford). Getrieben wurde diese Entwicklung durch die Mechanisierung der Produktion aufgrund einer zunehmenden Technikzentrierung des Managements bis hin zur Vorstellung einer vollständigen Automatisierung (vgl. die historische Nachzeichnung bei [1]). Beginnend mit der Automatisierung der Transporte zwischen Bearbeitungsstufen erfolgte die erste Entwicklung von FTS für den Einsatz in der Produktion und im Lager. Im Vergleich zu automatisierten Fördersystemen, beispielsweise Bandanlagen, sind die Investitionen in der Regel wesentlich geringer und die Flexibilität gegenüber Änderungen im Materialfluss wesentlich höher [2]. Zudem gelten Transporte als unproduktiv, müssen aber in Produktions- und Lagersystemen eine hohe Zuverlässigkeit aufweisen.

18.2.1 Fahrerlose Transportsysteme im Innenbereich

Typische Einsatzbereiche von FTS im Innenbereich bestehen einerseits zwischen den Produktions- und Montagestufen und andererseits im Wareneingang und Warenausgang sowie in der Kommissionierzone und im Lagerbereich. Dabei sind FTS und Arbeitsroboter, beispielsweise zum Kommissionieren, Pallettieren etc., häufig baulich miteinander verbunden. In der innerbetrieblichen Logistik war der Begegnungsfall zwischen Mensch und FTS/FTF daher immer vorgesehen, da FTS/FTF in der Regel weitere Funktionen, z. B. als Kommissionierhilfsmittel, übernehmen. Die frühen Personenschutzkonzepte arbeiteten mit taktilen, mechanischen Bügeln bzw. Bumpers [2]. Heute kommen vermehrt Laserscanner zum Einsatz, die in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit bis zu sieben Meter abdecken [2] und häufig mit weiteren Sensortechniken kombiniert werden. Die Stabilisierungsebene spielt im innerbetrieblichen Transport eine untergeordnete Rolle, da das Unternehmen den Untergrund selbst im fahrfähigen Zustand hält.

Die Bahnführungsebene im Indoor-Bereich der innerbetrieblichen Transporte erfolgte bei den frühen Systemen in der Regel mithilfe von stromführenden Leitern, die im Hallenboden eingelassen waren. Heute werden folgende Typen zur Positionserkennung und Positionierung unterschieden [3]: Auf der einen Seite kommt weiterhin die physische Leitlinie zum Einsatz, ausgeführt als aktiv-induktive Leitspur, als Magnetband oder als optische Leitspur. Auf der anderen Seite wird mit Technologien zur freien Navigation gearbeitet, bei denen die Orientierung mithilfe von Bodenmarken (Metall, Magnet, Transponder) oder auf Basis der Lasertechnologie, bei der die Positionsbestimmung ähnlich funktioniert wie in der Seeschifffahrt (Kreuzpeilung), erfolgt. Neuere Technologien kombinieren Laserscanner und Kamerasysteme mit digitalen Umgebungskarten und machen eine Navigation mittels Umgebungsmerkmalen möglich.

Für die Datenübertragung zwischen den stationären und den mobilen Einheiten eines FTS kam früher die induktive bzw. die Infrarot-Datenübertragung zum Einsatz. Heute sind Schmalbandfunk und immer mehr Breitbandfunk (WLAN) vorherrschend. Die Funkpeilung ermöglicht eine Ortung mittels Indoor-GPS (Global Positioning System) mit einer Genauigkeit bis zu 0,5 Metern und mittels Outdoor-GPS mit einer Genauigkeit von zehn Metern, dGPS (Differential GPS) mit einer Genauigkeit bis zu einem Meter oder dGPS mit Phasenauswertung mit einer Genauigkeit bis zu 0,1 Metern.

Fahrzeuge bekommen ihre Fahraufgaben zugewiesen und werden koordiniert [2]. Das Steuerungskonzept besteht aus einer Leitsteuerung, durch die die Transportauftragsabwicklung mit der Transportauftragsverwaltung, der Fahrzeugdisposition und der Fahrauftragsabwicklung zentral erfolgt. Die Verkehrsleitsteuerung ist ein Teil der Fahrauftragsabwicklung. Die Freigabe einzelner Streckenabschnitte geschieht ähnlich wie im Bahnverkehr in Blockstrecken, die jeweils nur von einem Fahrzeug belegt werden dürfen.

Eine beispielhafte Anlage wurde in einem Distributionszentrum eines Logistikdienstleisters im Jahr 2011 realisiert [3]. Bei der Kommissionierung kommen FTS zum Einsatz, die auch die Kommissionierer mit sich führen. Die Sicherheit des Mitfahrers wird durch verschiedene Maßnahmen hergestellt, die wie beim Bahntransport vom Zugführungspersonal verlangen, dass er eine bestimmte Position mit den Händen und Füßen einnimmt. Andere Betätigungen sind daher während der Fahrt nicht möglich. Das Personenschutzkonzept erfolgt mittels Laserscanner. Für die Navigation wird die Magnetpunktfolge genutzt, und für die Leitsteuerung kommt zur Datenübertragung die WLAN-Technologie zum Einsatz.

Die FTS/FTF-Leitsteuerung erfolgt auch in den neueren Anlagen zentral. Die Erweiterung der Systeme ist daher immer mit einem großen Aufwand verbunden, sodass auch hier zu autonomen, dezentralen Steuerungslösungen geforscht wird.

Ein aktuelles Beispiel ist der autonome Schubmaststapler als Ergebnis des Projekts „marion (mobile, autonome, kooperative Roboter in komplexen Wertschöpfungsketten)“, das im Rahmen des Technologieprogramms „Autonomik“ (Autonome und simulationsbasierte Systeme für den Mittelstand) entwickelt wurde. Die Fahrzeuge bekommen ihre Aufgaben von einem übergeordneten System zugewiesen. Der Stapler führt diese Aufgabe autonom aus und berechnet und entscheidet selbstständig über den optimalen Fahrweg. Er ist mit einem 3-D-Laser, Laserscanner und Kameras zur 3-D-Umgebungserfassung ausge-

stattet. Durch Sensorenbündel kann der Stapler die Umgebung exakt erfassen, die Objekt-abmessung und die räumliche Position des Objekts bestimmen.

Eine dezentrale Steuerung stellen beispielsweise [4] vor, die im Rahmen des Projekts „Dezentrale, agentenbasierte Selbststeuerung von Fahrerlosen Transportsystemen (FTS)“ erarbeitet wurde. Darin sind für jedes Fahrzeug verschiedene Agenten modelliert. Die Routenplanung und Auftragsvergabe erfolgt kooperativ. Simulationen ergaben eine Reduzierung der Gesamtstrecke aller FTF und des Leerfahrtenanteils um rund acht Prozent, der Durchlaufzeit um 22 Prozent sowie eine geringe Auslastungserhöhung der FTF [5]. Am Fraunhofer Institut für Materialflusstechnik und Logistik (IML) wurde im Projekt „Schwarmintelligenz für die Logistik“ ein zelluläres Transportsystem entwickelt, das auf die Schwarmintelligenz aufbaut. In diesem System erhält der Schwarm (die Transportmittel) die Transportaufträge, das nächstgelegene Transportmittel übernimmt den Auftrag und sucht sich dynamisch den kürzesten Weg.

18.2.2 Fahrerlose Transportfahrzeuge im Außenbereich

Typische Einsatzbereiche autonomer Fahrzeuge im Außenbereich, aber auf privatem Gelände, sind beispielsweise FTS für Schwertransporte oder werksinterne Shuttle-Verkehre.

Auf einem Container-Terminal transportieren sogenannte Automated Guided Vehicle (AGV) Container zwischen den Containerbrücken und dem Containerlager [6]. Dadurch sollen Fahrstrecken verkürzt und Leerfahrten reduziert sowie alle Ressourcen optimal ausgelastet werden. Für die Positionsbestimmung werden im Boden eingelassene Transponder genutzt. Die Routenplanung erfolgt selbstständig, ebenso wie der Batteriewechsel. Die Leitsteuerung erfolgt per Datenfunk.

In Deutschland ist ein starker Treiber des führerlosen Lkw ein Unternehmen, das ursprünglich aus der Funktechnik kommt. Im Jahr 2012 wurde beispielsweise durch dieses Unternehmen ein fahrerloser Lkw-Shuttle zwischen dem Produktions- und Logistikgebäude auf dem Werksgelände einer Molkerei realisiert [7]. Die Be- und Endladung der mit Verpackungsmaterial bzw. Frischprodukten beladenen Euro- und Industriepaletten erfolgt automatisch. Zur Spurführung dienen Transponder in der Fahrbahn. Unter der Zugmaschine ist ein Sensor angebracht, der die Markierung im Boden zur Positionierung und Wegfindung nutzt. Unterstützt durch lenkbare Hinterachsen können kleinere Hüllkurven gefahren und eine auf zwei Zentimeter genaue Positionierung erreicht werden. Laserscanner kontrollieren die Umgebung und stellen zusammen mit Schaltleisten und Not-/Aus-Tasten den Schutz von Personen, Ware und Fahrzeug sicher.

Im Projekt „Sichere autonome Logistik- und Transportfahrzeuge (SaLSA)“ erfolgten technologische Weiterentwicklungen, die den Begegnungsfall von FTS, Lkw und Personen im Außenbereich sicherer machen [8]. Im Außenbereich besteht das Sicherheitskonzept aus Radarsensoren, da dort keine Laserscanner zugelassen sind. Durch die kooperative Erfassung der Umgebung durch mobile und stationäre Sensorik wird die Sicherheit auch bei höheren Geschwindigkeiten (Wirtschaftlichkeit) realisiert.

18.2.3 Autonome Fahrzeuge für den Straßengütertransport außerhalb von Betriebsgeländen

Die Entwicklung autonomer Fahrzeuge für den Gütertransport bzw. die Logistik außerhalb von Betriebsgeländen ist vor allem problemorientiert getrieben. Sogenannte Fahrroboter entstanden für den Einsatz in gefährlichen Situationen, z. B. zur Entschärfung von Munition, oder für den Einsatz in kaum zugänglichen Gebieten, wie beispielsweise für unterirdische Explorationen in der Tiefsee, für Arbeiten am Hang oder in dichtbewachsenen Wäldern oder auch in entlegenen Gebieten, beispielsweise für den Einsatz im Bergbau.

Sehr große automatisierte Lkw mit einer maximalen Beladung von 290 Tonnen kommen seit den 1990er-Jahren in einer der weltgrößten Eisenerzminen in Australien zum Einsatz [9]. Die Gründe für deren Entwicklung waren vor allem Schwierigkeiten bei dem zu akquirierenden Personal für den gefährlichen Schichtdienst im Outback und die hohen logistischen Anforderungen an die Personaleinsatzplanung und den Personentransfer.

Die Navigation erfolgt mit Radar und Lasern sowie durch den Einsatz von Wegpunkten zur Orientierung. Kontroll- und Eingreifmöglichkeiten sind über eine Betriebszentrale mittels WLAN möglich. Die Steuerung erfolgt durch GPS und Koppelnavigation wie bei einem Schiff oder Flugzeug durch laufende Ortsbestimmung (Ortung) indem der Kurs, Fahrt (Geschwindigkeit) und die Zeit ermittelt werden.

18.2.4 Entwicklungen autonomen Fahrens und autonomer Fahrzeuge in den anderen Verkehrsträgern

Auch die anderen Verkehrsträger sind durch eine Zunahme der Automatisierung gekennzeichnet, bei denen technische Systeme zur Stabilisierung, Navigation (z. B. digitale Karten) und Umweltwahrnehmung zunehmend zum Einsatz kommen.

Flugzeuge sind bereits seit Beginn des 20. Jahrhunderts mit Systemen zur Stabilisierung ausgerüstet, der Autopilot ist schon seit Langem die Regel und die ersten Drohnen fliegen in Deutschland für das Militär, die Polizei oder die Feuerwehr. Unmanned Aerial Systems oder auch Unmanned Aerial Vehicles (UAV) kommen in anderen Ländern auch im zivilen Bereich zum Einsatz, beispielsweise ersetzen sie Rancher und Inspektoren im Außenbereich. Drohnen überwachen Felder oder säen aus bzw. führen biologische Schädlingsbekämpfung durch. Kleine Drohnen kommen aber auch schon in Deutschland zum Einsatz, beispielsweise für die Begutachtung von Schäden durch Sturm oder Brand, in der Filmproduktion und bei Industrieinspektionen. Die Deutsche Bahn testete Drohnen für die Überwachung von Fahrzeugen und Infrastruktur. Weiter gibt es Pilotstudien im Bereich des Transports von Wirtschaftsgütern, insbesondere von Paketen. Derzeitige Drohnen könnten bei einer Tragfähigkeit von bis zu 2,5 Kilogramm und einer Reichweite von rund 15 Kilometern beispielsweise Fast-Food oder Medikamente ausliefern. Auch eine Drohne, durch die ein Defibrillator transportiert werden kann, wurde bereits getestet. Die Nutzung von Drohnen für gewerbliche Zwecke über fünf Kilogramm ist mit einer Pauschal-

genehmigung in vielen Bundesländern möglich; allerdings nicht in kontrollierten Lufträumen [10].

Die ersten Forschungsprojekte zur unbenannten Seeschifffahrt laufen derzeit (z. B. das europäische Projekt MUNIN). Unbemannte U-Boote sind schon seit Längerem im Einsatz. Konzepte für Drohnenschiffe werden von unterschiedlichsten Akteuren entwickelt. Ein Konzept ähnelt dem Platooning (s. Abschn. 18.3.4) im Straßenverkehr [11]. Im Unterschied zum Flugverkehr ist es möglich, dass bei stark befahrenen Abschnitten, beispielsweise beim Hafenanlauf, eine Besatzung jederzeit zusteigen kann. In der Regel werden diese Systeme – und werden es wohl auch zukünftig – nicht vollständig autonom agieren. Zwar können Ausweichmanöver selbstständig erfolgen, jedoch ist davon auszugehen, dass es eine zentrale Überwachung und Fern-Steuerung (Tele-Operation) geben wird, wobei beide Instanzen nicht identisch sein müssen.

Die Fernsteuerung von führerlosen Eisenbahnen findet bereits seit Jahren statt. Autonomes Fahren würde die freie Navigation mit einschließen und wäre nur für sehr kleine Einheiten zweckmäßig. Bisherige Ansätze für kleinere Gütertransporteinheiten auf der Bahn wie beispielsweise der CargoSprinter waren bisher nicht erfolgreich. Teilweise auch, weil eine schnelle Technik zur Zugbildung und -splittung nicht existiert und daher eine eigene Antriebstechnologie je Waggon notwendig ist. Dieses Manko griff das Konzept RailCab auf [12]. Hier nutzen autonome, mit Linearmotoren angetriebene Fahrzeuge das Rad-Schiene-System. Die Zugbildung erfolgt über eine elektronische Deichsel. Dies ist teuer und es gibt kaum sinnvolle Einsatzfälle, bei denen nicht der Lkw ebenso den Transport übernehmen könnte. Auf den Hauptläufen sprechen Effizienzgewinne durch den Massendegressionseffekt gegen ein nicht-vordisponiertes Routing und eine variable Konvoibildung. Es könnten sich aber ökonomisch sinnvolle Einsatzfälle gerade auf den nicht-elektrifizierten Nebenstrecken ergeben. Bisher sind allerdings keine Studien bekannt, die den ökologisch-ökonomischen Vergleich unter Marktbedingungen anstellen.

18.2.5 Zwischenfazit

FTS bestehen aus einer Leitsteuerung, insbesondere zur Auftragsvergabe und Routenplanung, einem Kommunikationssystem und den Fahrzeugen [4]. Schon seit Langem existieren fahrerlose Transportsysteme und -fahrzeuge (FTS/FTF) für den innerbetrieblichen Transport mit geringen Automatisierungsstufen. Dabei hat der Automatisierungsgrad mit den technologischen Möglichkeiten zugenommen, allerdings anders als im öffentlichen Straßenverkehr. Beispielsweise sind die Sicherheitskonzepte, aufgrund der geltenden Maschinenrichtlinie anders ausgestaltet. In der Vergangenheit war es ausreichend, dass sich die FTS/FTF in der innerbetrieblichen Logistik vorwärts bewegen konnten. Dies erfolgt in der Regel in Szenarien, in denen die Menschen auf die fahrerlosen Fahrzeuge eingestellt waren. Teilweise gibt es eine räumliche Trennung von Mensch und Fahrzeug. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sich die Sicherheitskonzepte auf ein Minimum beschränken, da die FTS/FTF bei geringen Geschwindigkeiten operieren und in bekannter Szenerie.

Die technologische Weiterentwicklung bezog sich schwerpunktmäßig auf die korrekte Ausführung der Transportaufgabe und gegebenenfalls auf damit verbundene Aufgaben wie beispielsweise die Lastaufnahme bzw. -abgabe. Allerdings ist davon auszugehen, dass die Anforderungen an die Flexibilität der FTS/FTF-Systeme umso größer werden, je mehr sich die Produktion von der linear getakteten Fertigungsstraße entfernt und je flexibler die Produktions- und Kommissioniersysteme werden. Derzeit scheinen autonome Systeme basierend auf der Agententechnologie den Anspruch an die Verarbeitung eines zunehmenden Datenvolumens und einer steigenden Komplexität durch die Dezentralisierung von Datenbereitstellung und Entscheidungsfindung am ehesten leisten zu können.

Outdoor-Lösungen für den Gütertransport beruhen auf konventionellen Straßenfahrzeugen und sind bisher nur auf Betriebsgeländen im Regeleinsatz mit wenigen Einsatzfälle. Es ist aber eine ähnliche Entwicklung denkbar wie im Indoor-Bereich.

Es stellt sich also bei den FTS/FTF vor allem die Frage danach, wie sich die Autonomie der Einheiten weiterentwickelt. Automatische Steuerung und fahrerlose Fortbewegung sind per Definition schon immer Elemente von FTS/FTF gewesen. Der Grad an Autonomie ist definiert als die Anzahl der Freiheitsgrade. Diese hängen beispielsweise von der freien Wahl der Strecke und Geschwindigkeit ab, um sich selbstständig auch bei sich verändernden Umweltsituationen zu einem Ziel hin zu bewegen.

Der Einsatz von mobilen Maschinen bildet einen Schnittstellenbereich zwischen Arbeitsrobotern und Fahrzeugen. Ebenso wie bei den innerbetrieblichen Transportsystemen wird häufig die Transportaufgabe mit weiteren „produktiven“ Aufgaben kombiniert. Es handelt sich zum größten Teil um tele-operierte Systeme. Eine autonome Entscheidungsfindung für die Wegfindung ist also in der Regel nicht gegeben. Dies scheint auch in den meisten Einsatzfällen keinen Mehrwert zu schaffen.

Die konzeptionelle Ausgestaltung der Automatisierungslösungen hing in den Anfangsphasen sehr stark vom Anwendungskontext ab. Diese historischen Systemelemente finden sich auch in den neueren Konzeptansätzen in der Regel wieder, insbesondere hinsichtlich der Sicherheitskonzepte bzw. des Personenschutzes. Erst die mit den neuen Informations- und Kommunikationstechnologien möglichen dezentralen Konzepte lassen nun die unterschiedlichen Systemlösungen zusammenwachsen. Insbesondere dort, wo eine hohe Flexibilität und Geschwindigkeit gefordert wird, gleichen sich die technologischen Lösungen immer weiter an. Allerdings unterscheiden sie sich hinsichtlich der realisierten Freiheitsgrade der Autonomie.

18.3 Anwendungsfälle im Bereich des autonomen Gütertransports

Aufbauend auf den vorliegenden Erfahrungen werden im Folgenden potenzielle Einsatzfelder für autonome Fahrzeuge im Bereich des Gütertransports anhand der in Kap. 2 generisch beschriebenen Anwendungsfälle skizziert. Im Mittelpunkt steht der Transport eines aufgegebenen Förderguts im Straßengüterverkehr. Potenzielle Einsatzfelder weiterer Segmente des Wirtschaftsverkehrs wie beispielsweise der Personenwirtschaftsverkehr oder der

Gütertransport, der im Rahmen der Produktionsfunktion anfällt (selbstfahrende Arbeitsmaschinen), werden nicht betrachtet.

Aufbauend auf einer konzeptionellen Beschreibung des jeweiligen Anwendungsfalls anhand der Merkmalsausprägungen erfolgt eine erste Einschätzung von Nutzen bzw. Chancen und Risiken einer derartigen Einführung. Vorab ist ein Exkurs zu den Automatisierungsgraden des Fahrens für den Gütertransport eingefügt, um die Ausdifferenzierung der Anwendungsfälle besser nachvollziehbar zu machen.

18.3.1 Exkurs: Automatisierungsgrade des autonomen Gütertransports

Für die Einordnung von Notwendigkeit und Nutzen eines konkreten Automatisierungsgrads im Gütertransport soll hier noch einmal kurz die Definition der Fahraufgabe nach [13] genutzt werden, wonach sich die Fahraufgabe folgendermaßen untergliedern lässt: Die sichere Ausführung der Fahraufgabe benötigt Informationen und Wissen über die Verkehrssituation auf der Bahnführungsebene, über die Fahrbahnoberfläche auf der Stabilisierungsebene sowie über das Straßennetz auf der Navigationsebene. Das sichere Führen des Fahrzeugs erfordert Lenken, Gas geben und Bremsen sowie Entscheidungen über die Geschwindigkeit und die Spur zur Längs- und Querverführung des Fahrzeugs. Diese Entscheidungen werden in Abhängigkeit von Informationen über die Umweltbedingungen und dem damit verbundenen Handlungswissen getroffen.

Die Bundesanstalt für Straßenwesen kategorisiert automatisiertes Fahren in vier Entwicklungsstufen [14]: assistiertes Fahren (1), teilautomatisiertes Fahren (2), hochautomatisiertes Fahren (3) und vollautomatisiertes Fahren (4). Bei den drei erstgenannten Stufen übernimmt das System für einen gewissen Zeitraum und/oder in spezifischen Situationen Teilaufgaben der Fahraufgabe. Der Fahrer ist aber mindestens als Kontrollorgan vorhanden. Für die letzte Stufe des vollautomatisierten Fahrens (4) gehen [14] davon aus, dass das Fahrzeug frei navigiert und kein Fahrer (als Rückfallebene) benötigt wird.

Im Bereich des Gütertransports existieren fahrerlose Transportsysteme auch schon auf geringen Automatisierungsstufen. Mit einer Zwischenstufe zwischen (3) und (4) ist eine weitere relevante Ausprägung in der Transportpraxis zu beobachten: Das Fahrzeug ist hochautomatisiert und fahrerlos, eine freie Navigation erfolgt nicht. Häufig findet ein tele-operiertes Fahren statt, bei dem ein Operator das Fahrzeug von einer Zentrale aus fernsteuert.

18.3.2 Anwendungsfälle des autonomen Gütertransports

Assistierte und teilautomatisierte Systeme sind heute schon zum großen Teil in Serienfahrzeugen im Einsatz. Sie übernehmen über einen gewissen Zeitraum und/oder in spezifischen Situationen die Längs- und/oder Querverführung des Fahrzeuges. Bei den assistierten Systemen erfolgt eine Warnung des Fahrers, bei den teilautomatisierten Systemen übernimmt

das System die Regelung [3]. Durch eine Kontrollinstanz, im Straßenverkehr der Fahrer, wird das Fahrzeug permanent überwacht. Die bekanntesten Fahrerassistenzsysteme (FAS) sind das Antiblockiersystem (ABS) und das Elektronische Stabilitätsprogramm (ESP). Nach einem schweren Unglück sind seit November 2013 Spurwechsel- und -halteassistenten sowie Abstandsregeltempomaten frühzeitig für Neufahrzeuge verpflichtend geworden. Weitere Systeme sind in der Entwicklung oder bereits serienreif, wie Kippschutzsysteme, Abbiege- oder Einparksysteme. Sie zielen vor allem darauf ab, den Fahrer auf der Bahnführungsebene und der Stabilisierungsebene zu entlasten.

Hoch- und vollautomatisierte Fahrzeuge können darüber hinaus frei navigieren, sie sind situations- und infrastrukturunabhängig. Vollautomatisierte Systeme kommen ohne Fahrer aus. Es werden nicht nur Aktivitäten auf der Navigationsebene vom Fahrer übernommen, sondern auch diejenigen Aktivitäten, die notwendig sind, um das System wieder in einen risikominimalen Zustand zu versetzen, wenn Komponenten ausfallen.

Aus der Perspektive von Güterverkehr und Logistik stehen hier daher weniger die technologischen Lösungen für die Stabilisierungs- und Bahnführungsebene im Mittelpunkt. Vielmehr interessieren mögliche Anwendungsfälle mit und ohne Fahrer bzw. freier Navigation. Daher werden folgende Ausdifferenzierungen in Anwendungsfällen näher betrachtet:

1. **AutobahnpiLOT** als hochautomatisiertes Fahren mit Fahrer und freier Navigation,
2. **Vehicle-on-Demand** als vollautomatisierte Fahrt ohne Fahrer und mit freier Navigation,
3. **Vollautomat mit Verfügbarkeitsfahrer – Follow-me-Fahrzeug** als hochautomatisiertes Fahren ohne Fahrer und ohne freie Navigation (fehlender Anwendungsfall 3/4),
4. **Valet-Parken** als hochautomatisiertes Fahren ohne Fahrer und ohne freie Navigation (fehlender Anwendungsfall 3/4).

Im Folgenden werden die Anwendungsfälle vorgestellt und erste Argumente für und gegen den gewählten Autonomiegrad in Logistik und Güterverkehr aufgeführt. Es wird jeweils geprüft, inwieweit die Anwendungsfälle im Güterverkehrssystem mit den „Use Cases des Autonomen Fahrens“ (s. Kap. 2) im Individualverkehr deckungsgleich formuliert werden und wodurch sich Unterschiede und daraus andere Umsetzungsvoraussetzungen ergeben.

18.3.3 AutobahnpiLOT mit Fahrer und freier Navigation

Der AutobahnpiLOT bezeichnet den Anwendungsfall, in dem ein Fahrer zum Einsatz kommt, der Fahrer aber jederzeit verfügbar ist. Der Fahrer übergibt die Stabilisierungs- und die Bahnführungsebene idealerweise unter Angabe einer Zieladresse (und damit auch die Navigation) an den Fahrer. Der Einsatz eines Autobahnpiloten ist zwischen Autobahnauffahrt und -ausfahrt angedacht. Der Fahrer übernimmt bei unklaren Fahrsituationen (z. B. Baustellen).

Der Nutzen des Autobahnpiлотen wird vor allem in der Reduzierung von Unfällen und einem besseren Verkehrsfluss gesehen. Insbesondere bei Stau oder zähfließendem Kolonnenverkehr, aber auch bei langen, eintönigen Fahrten und durch den weiter zunehmenden Termindruck sind die Fahrer häufig an der Grenze ihrer Leistungsfähigkeit. Neben der Entlastung des Fahrers von stressbehafteten Fahrsituationen wird Arbeitszeit frei, die für andere Tätigkeiten genutzt werden kann. Hier gibt es Überlegungen, auch dispositive Tätigkeiten wie die Tourenplanung oder das Fuhrparkmanagement zu dezentralisieren.

Ein derartiger Einsatzfall ist bereits erprobt. Scania stellte im Jahr 2013 einen Lkw vor, der bis zu einer Geschwindigkeit von 50 km/h „selbstständig beschleunigen, bremsen und lenken“ konnte [15]. Im Jahr 2014 ließ Daimler einen Lkw bis zu 85 km/h autonom auf einem gesperrten Autobahnabschnitt zwischen anderen Fahrzeugen fahren [16].

Der konzipierte Autobahnpiлот entspricht einer vollautomatisierten Fahrt. Aufgrund von Sicherheitsbedenken ist allerdings ein Verfügbarkeitsfahrer vorgesehen, sodass nur von einer hochautomatisierten Fahrt gesprochen werden kann. Die Einsatzhöchstgeschwindigkeit und die höhere maximal zulässige Gesamtmasse erfordern in ihrer Kombination andere Sicherheitskonzepte als im Individualverkehr.

Veränderungen werden vor allem beim Berufsbild des Fahrers erwartet. Bisher lernt er viel über die Fahrzeugtechnik und Ladungssicherung. Übernimmt der Fahrer weiterhin die technische Überprüfung des Fahrzeugs? Welche ökonomischen und ökologischen Einsparungen wären mit dem neuen Konzept verbunden?

18.3.4 Vehicle-on-Demand als Autobahnfahrt ohne Fahrer mit freier Navigation

Vehicle-on-Demand entspricht am ehesten dem Anwendungsfall, der im Bereich des Gütertransports als autonom, dezentral gesteuertes FTS/FTF bekannt ist. Ein Fahrersitz ist nicht vorgesehen. Allerdings kann sich in dem in Kap. 2 skizzierten Anwendungsfall das Fahrzeug bis zu einer Geschwindigkeit von bis zu 120 km/h und auch in unbekanntem Szenarien bewegen.

Es spricht einiges dafür, dass der Anwendungsfall „Vehicle-on-Demand“ den Wunschvorstellungen der Unternehmen nach autonomen Fahrzeugen im Güterverkehr sehr nahekommt: Der gut die Landessprache sprechende Fahrer, der bereit ist, die weiten Autobahnfahrten mit langen Abwesenheitszeiten bzw. unregelmäßigen Einsatzzeiten für einen geringen Lohn zu übernehmen, ist immer seltener zu finden. Übermüdete Lkw-Fahrer sind der häufigste Grund für schwere Unfälle. Das Andocken und das Manövrieren in engen Belieferungssituationen ist grundsätzlich für den Fahrer keine einfache Aufgabe.

Der Einsatz von Automatisierungstechnik könnte also von großem Nutzen sein. Allerdings wird sich die Freigabe aller Szenarien für schwere Lkw, insbesondere aufgrund von Sicherheitsbedenken und notwendigen Änderungen in der Supply Chain (s. Abschn. 18.4), noch einige Zeit hinauszögern.

Mittelfristig eher realisierbar scheint der AutobahnpiLOT ohne Fahrer und mit freier Navigation zwischen Rendezvous-Punkten, beispielsweise zwischen Autohöfen auf Autobahnen, oder zwischen gut angebundenen Gewerbegebieten. Die Realisierungswahrscheinlichkeit dieses Anwendungsfalls könnte durch folgende Erweiterungskonzepte erhöht werden:

Sicherheitsbedenken gegenüber einem fehlenden Fahrer auf der Rückfallebene könnten durch separate Zu- und Abfahrten für autonome Fahrzeuge verringert werden, da Begegnungsfälle mit anderen Fahrzeugen auf ein Minimum reduziert werden würden. Durch die Nutzung einer eigenen Fahrspur (*dedicated lane*) durch autonome, gekoppelte Fahrzeuge könnten diese vermieden werden. Gleichzeitig könnte diese separate Fahrspur Ausgangspunkt für ein erweitertes Konzept mit alternativer Antriebstechnologie bilden, wenn diese Spur beispielsweise mit einer Oberleitung zur elektrischen Versorgung ausgestattet ist.

Die Kopplung von Fahrzeugen (*Platooning*) würde die Ausgangskonzeption, in der ein Verfügbarkeitsfahrer im vorausfahrenden Fahrzeug als Rückfallebene zur Verfügung steht, mit dem Erweiterungskonzept, in dem Fahrzeuge autonom ohne Fahrer fahren, kombinieren und die Vorteile beider Konzepte nutzen. Über ein Softwaresystem sind die Kolonnenfahrzeuge zusammenschaltet. Für die sogenannte elektronische Deichsel bei hohen Geschwindigkeiten sprechen neben der besseren Ausnutzung der Straßeninfrastruktur vor allem die durch die Verringerung des Luftwiderstands erzielbaren Kraftstoffeinsparungen und Emissionsreduzierungen.

Mit der sogenannten elektronischen Deichsel wurden bereits seit Mitte der 1990er-Jahre mehrere Tests durchgeführt (siehe z. B. die europäischen Projekte „CHAUFFEUR I und II“, „Safe Road Trains for the Environment (SARTRE)“, „Cooperative mobility solution for supervised platooning (COMPANION)“, das kalifornische „PATH-Programm“, das deutsche „KONVOI-Projekt: Entwicklung und Untersuchung des Einsatzes von elektrisch gekoppelten Lkw-Konvois auf Autobahnen“, das japanische „ITS Projekt“ der New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO)). In diesen Projekten führen mehrere Lkw bzw. ein Konvoi von führendem Lkw und folgenden Pkw bis zu 90 km/h sicher bei einem minimalen Abstand von vier Metern. Die Systeme basieren auf Radarsensoren, Stereokameras, dreidimensionalen Karten und meist auf den Datenaustausch mit anderen Fahrzeugen. Die bisherigen Versuche erfolgten immer mit einem Fahrer im Führungsfahrzeug und teilweise mit oder ohne Verfügbarkeitsfahrer in den Folgefahrzeugen. Es existieren auch bereits erste Ideen für ein fahrerloses Führungsfahrzeug.

In der Regel bauen diese Projekte auf bereits erprobter Technik auf: Die in Serien-Lkw verbauten Adaptive Cruise Control-Systeme dienen der Abstandskontrolle. Die Datenübertragung zwischen Führungs- und Folgefahrzeug erfolgt häufig mittels WLAN oder Infrarot.

Die ermittelten Kraftstoffeinsparungen bzw. CO₂-Minderungspotenziale fielen in Abhängigkeit der gewählten Vehicle-to-Vehicle (V2V)-Kommunikation (bei „versetztem Fahren“), der Art und des Aufbaus des Führungsfahrzeugs und der Folgefahrzeuge, des Abstands, der Geschwindigkeit sowie der Straßen- und Umweltbedingungen (Belag, Temperatur, Steigungen, Höhenlage) unterschiedlich aus. Sie betragen um die fünf Prozent beim Führungs-Lkw und zehn bis 15 Prozent bei den Folge-Lkw [17].

18.3.5 Vollautomat mit Verfügbarkeitsfahrer – Follow-Me-Fahrzeug

In dem in Kap. 2 vorgestellten Anwendungsfall übernimmt das Fahrzeug als Vollautomat immer dann, wenn die Szenerie freigegeben ist. Der Fahrer ist immer dabei und kann gegebenenfalls die Fahrzeugführung übernehmen. Im Grunde ist es eine Ausweitung des Autobahnpiiloten hinsichtlich der freigegebenen Szenerien und der zulässigen Geschwindigkeit und kommt dem autonomen Fahren sehr nahe.

Dieser Anwendungsfall ist aus wirtschaftlicher Perspektive nur dann interessant, wenn der begleitende Fahrer in dieser Zeit wertschöpfenden Tätigkeiten nachgehen kann. Gerade auf der sogenannten letzten Meile könnte die nächste Zustellung administrativ bereits während der Fahrt vor- bzw. nachbereitet werden. Derartige Fahrzeugkonzepte wären aber auch für den Einsatz im Personenwirtschaftsverkehr denkbar, beispielsweise für Tätigkeiten in der Altenpflege, in der Versicherungsvertretung etc., die ebenfalls mit Dokumentations- und Verwaltungstätigkeiten verbunden sind.

Als eine Vorstufe für einen Vollautomaten mit Verfügbarkeitsfahrer kann die bereits im Jahr 2011 vorgestellte Konzeptstudie „EmiL“ für ein teilautonomes Zustellfahrzeug dienen [18]. Bei diesem Fahrzeugkonzept muss der Zusteller nicht immer ein- und aussteigen, sondern kann über das Mobiltelefon das Fahrzeug anweisen, in Schrittgeschwindigkeit neben ihm herzufahren (Follow-me-Funktion). Bei allen unbekanntem Situationen (z. B. Einmündungen, Kreuzungen) ist zusätzlich der DriveStick-Modus vorgesehen, mit dem bis zu sechs km/h schnell gefahren werden kann. Durch die Nutzung einer lokalen WLAN-Verbindung wird einem Signalabbruch, wie er bei GPS-Verbindungen befürchtet wird und auftreten kann, entgegengewirkt.

Im Rahmen des Forschungsprojektes konnte eine Einsparung an täglicher Zustellzeit von 40 Minuten ermittelt werden. Das typische Verletzungsrisiko durch Verdrehen und Umknicken beim Aussteigen wird verringert.

18.3.6 Valet-Parken – Valet delivery

Das Valet-Parken bezeichnet den Anwendungsfall, in dem der Fahrroboter das Fahrzeug an einen zuvor zugewiesenen freien Parkplatz autonom navigiert. Im vorgestellten Konzept in Kap. 2 wird davon ausgegangen, dass dies auch im öffentlichen Raum bis zu einer Geschwindigkeit von 30 km/h möglich sein könnte. Ein Beispiel wäre die autonome Fahrt vom Wohnstandort des Fahrers zu einem definierten Parkplatz. Dieser Anwendungsfall ist für den Güterverkehr allerdings kaum vorstellbar, da es selten reservierte Lkw-Parkplätze mit einer Anbindung über das Nebenstraßennetz gibt.

Viel eher denkbar ist der Fall, dass in engen Innenstädten und in häufig nicht für große Lkw ausgelegten Anlieferzonen von Industrie und Handel der Fahrroboter das Einparken des Fahrzeugs oder das Andocken an die Rampe autonom übernimmt. Dadurch könnten teure Bagatellschäden verhindert werden. Der Fahrer wird von stressbehafteten Fahraufgaben entlastet, insbesondere dann, wenn er zugleich noch für die ermüdende, lange Auto-

bahnfahrt zuständig ist. Valet delivery könnte aber auch dabei helfen, dass die Fahrer ihre Ruhezeiten einhalten können, wenn die „Last-Last-Mile“ ohne ihr Zutun abgewickelt werden könnte.

Ein anderer Anwendungsfall könnte die Baustellenbelieferung sein. Bei großen Bauvorhaben werden immer häufiger im Umfeld der Baustelle sogenannte Wartezonen für Lkw vorgehalten. Beispielsweise könnten die Abläufe optimiert werden, wenn sich die Fahrer bei größeren Betongussaktionen auf die Pendelfahrt konzentrieren könnten und die Wartezeiten entfallen. Der Fahrroboter übernimmt die Fahrt zwischen Wartestelle und Bauplatz.

Die Umsetzung hängt rechtlich sehr stark von der zwischen Wartestelle und Einsatzstelle gegebenen Entfernung und konkreten Szenerie ab. Ansonsten scheint die Umsetzung eher eine mentale als eine technische Herausforderung zu sein. Insbesondere aus der Perspektive des Fahrers, der dann in Szenerien zum Einsatz kommt, in dem ihm per se unterstellt wird, dass er sein Arbeitsgerät nicht beherrscht.

18.4 Veränderungen in der Supply Chain durch einen höheren Automatisierungsgrad im Gütertransport

Der systematische Nachvollzug der Veränderungen in der Supply Chain durch einen höheren Automatisierungsgrad im Gütertransport erfolgt entlang der in Abb. 18.1 dargestellten generischen Supply Chain. Jede Supply Chain bzw. Lieferkette besteht aus einer Aneinanderreihung der Aktivitäten „Rohstoffgewinnung“, „Verarbeitung/Produktion“, „Handel“ und den dazwischen stattfindenden logistischen Prozessen „Warenausgang (Umschlag)“, „Transport“ und „Wareneingang (Umschlag)“. Darüber hinaus ist unter heutigen Bedingungen die Produktions- und die Filiallogistik ebenso interessant, wenn es um Veränderungsprozesse aufgrund des nicht mehr vorhandenen Fahrers geht, da dort sehr viele sogenannte Added-Value-Services von den Logistik-Dienstleistern erbracht werden.

Der „Transport“ erfordert neben dem Fahren selbst von dem Fahrer die Kontrolle des Fahrzeugs, die Routenplanung sowie die Dokumentation und weitere administrative Tätigkeiten (Warenbegleitpapiere). Diese sind im grenzüberschreitenden Verkehr noch umfangreicher (Zollabwicklung). Beim hochautomatisierten, fahrerlosen bzw. beim vollautomatisierten Fahren würde das häufige Problem der Lenk- und Ruhezeitüberschreitungen obsolet und Touren könnten anders geplant werden. Wenn der Transport hochautomatisiert erfolgt, wird erwartet, dass der Fahrer andere Aufgaben in dieser Zeit übernimmt. Er kann sich dann der Routenplanung, dem Fuhrparkmanagement oder der eigenen Erholung widmen [20].

Es kann also gleichzeitig zu einer Dezentralisierung und Parallelisierung von Funktionen kommen. Die Nutzung der Transportzeit für weitere Tätigkeiten ist allerdings nicht neu. Beispielsweise wurde die Behandlung von Postsendungen früher in Zügen vorgenommen (Postzug), Gleiches kann im Ausland beispielsweise auch bei den mobilen Depots (z. B. umgebaute Doppeldeckerbusse, „Floating Warehouse-Systeme“) beobachtet werden.

Grundsätzlich hat der Fahrer die Fahrzeugbe- und -entladung zu überwachen und teilweise sogar selbst durchzuführen. Im Warenausgang ist er für die Überprüfung der Fracht-

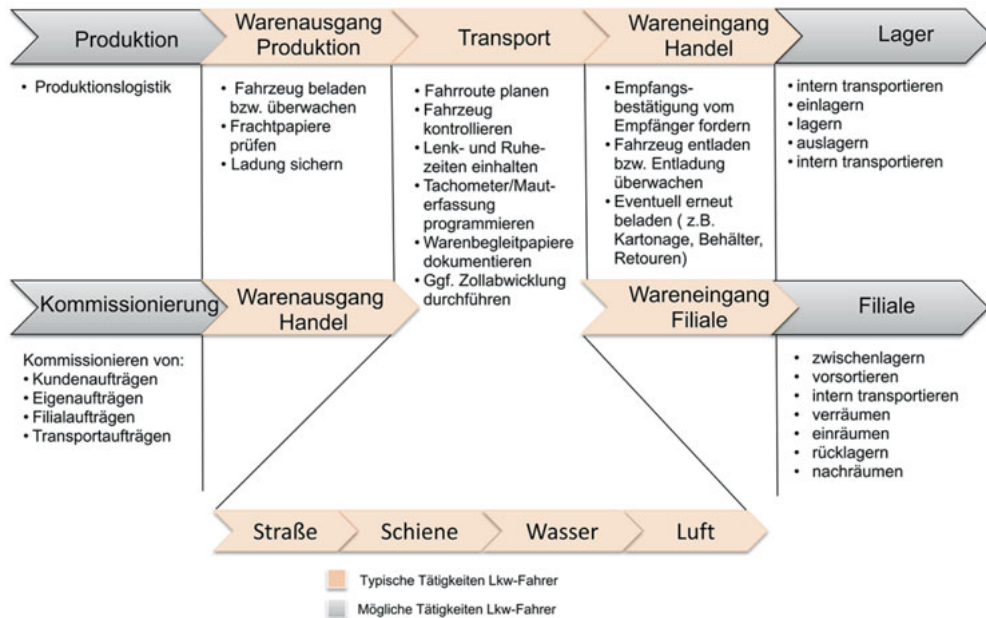


Abb. 18.1 Exemplarische fahrerrelevante Tätigkeiten einer generischen Supply Chain (Quelle: eigene Darstellung, basierend auf [19])

papiere und die Ladungssicherung zuständig. Im Wareneingang hat er eine Empfangsbestätigung zu fordern.

Im Bereich des Warenein- und -ausgangs sind heute Fahrer in vielen Lieferketten für die Entladung des Fahrzeugs zuständig. Ihre Aufgabe endet häufig an der Laderampe, teilweise aber erst nach dem Einräumen, Rücklagern oder Nachräumen am Band oder sogar nach Vorsortierung, internem Transport und der Verräumung der Waren in die Regale (teilweise in Zwischenlager oder Puffer). Wie früher ist es bei einigen Paket- und Briefzustellern Usus, dass der Fahrer die Kommissionierung der Aufträge selbst übernimmt.

Im Bereich der Produktion wären Einsatzfälle denkbar, beispielsweise im Werkverkehr, wo – ähnlich wie im innerbetrieblichen Bereich – Transportaufträge ausgeschrieben werden und sich autonome Lkw darum „bewerben“ und den Transportauftrag nach vordefinierten Kriterien gewinnen können. Hierfür wäre weder eine zentrale Leitsteuerung noch Wegfindung notwendig. Teilweise existieren bereits Güterschleusen, sodass im Falle des Gefahrenübergangs keine Personen anwesend sein müssen.

Würde der Fahrer das Fahrzeug nicht mehr „begleiten“, müssten diese Tätigkeiten von anderen übernommen werden. Die Unternehmen müssten wieder eigene Beschäftigte für diese Tätigkeiten einstellen bzw. anlernen. Denkbar wäre aber auch, dass sich für die Logistik-Dienstleister hier noch ein weiteres Geschäftsmodell ergibt. Es kann also wieder zu einer Aufwertung von Arbeit allgemein und der Schaffung von lokaler Arbeit vor allem im urbanen Raum kommen. In anderen Fällen wäre es aber auch denkbar, dass der Automatisierungsgrad im Warenein- und -ausgang weiter zunimmt.

Veränderungen in den Transportsystemen selbst sind vor allem an der Schnittstelle zwischen unbemannter und bemannter Fahrt zu erwarten sowie im Aufgabenprofil der Fahrer. Die sich ergebenden prozessualen Veränderungen im Bahn- und Schiffsverkehr sowie für das Tätigkeitsspektrum der Menschen scheinen nicht so gravierend zu sein. Der Fahrer entfällt und wird durch einen Fahrroboter ersetzt. Die restliche Technik von Bahn und Schiff stehen bisher unter einem Veränderungsvorbehalt. Allerdings könnten neue Berufsbilder entstehen, wenn beispielsweise im Seeverkehr der Sicherheitsaspekt gegen Angreifer höher gewichtet wird als die Navigation.

18.5 Erste einzelwirtschaftliche Einschätzungen von automatisierten Systemen in der Gütertransportkette

Fehlendes Fahrpersonal, energiesparende Fahrweise, hohe Zuverlässigkeit und effiziente Unfallvermeidung sind aus einzelwirtschaftlicher Perspektive gewichtige Gründe, autonome Systeme in der Gütertransportkette einzusetzen. In einigen Industrien ist der Materialfluss inzwischen vom Wareneingang über die Produktionsstraßen bis hin zum Warenausgang hochautomatisiert und fahrerlos gestaltet und weist damit keine Unterbrechungen und keine Liegezeiten auf. Auch die Beschickung und Entnahme aus den Lägern erfolgt in einigen Branchen hochautomatisiert und fahrerlos. Teilweise sind die Steuerungen von Lager und Produktion aufeinander abgestimmt und reichen vom automatisierten Wareneingang zum automatisierten Warenausgang.

Mit der Entwicklung der Radio Frequency Identification (RFID)-Technologie und der Wiederentdeckung der alten Idee von Leonardo da Vinci, von der Natur zu lernen (Bionik), wurde die Debatte um Selbststeuerung inspiriert und führte zu einer intensiven Diskussion um Dezentralisierung und Autonomie der Entscheidungsfindung technischer Systeme. Unterstützt durch die technologischen Entwicklungen von kostengünstigen Sensoren und internetgestützten Softwaresystemen hat der Automatisierungsgrad daher immer weiter zugenommen. Die neuesten Systeme in Produktion und Lager setzen auf die Selbststeuerung (Internet der Dinge) der Fahrzeuge und Fördersysteme, die autonom auf veränderte Arbeitsanforderungen, Zustände und Umfeldbedingungen reagieren können.

Ausgehend von der innerbetrieblich in bestimmten Branchen stark vorangeschrittenen Automatisierung von FTS/FTF ist mit einer weiteren Verschiebung der menschlichen Aktivitäten hin zu konzeptionellen und überwachenden Tätigkeiten zu rechnen. Durch den Einsatz von fahrerlosen Fahrzeugen im gesamten logistischen System ist damit zu rechnen, dass in vielen Supply Chains Prozesse reorganisiert werden müssen (s. Abschn. 18.4). Allerdings wird die Automatisierung wie bisher verstärkt in einzelnen Branchen zunehmen, da Aufwand und Nutzen nicht überall in einem angemessenen Verhältnis stehen werden und sich gerecht verteilen lassen.

Innerhalb des Transportsystems im öffentlichen Raum würden das Entfallen des Fahrers und/oder dessen veränderte Rolle zu zusätzlichen Schnittstellen führen, die gestaltet werden müssen. Das Zu- und Aussteigen des Fahrers bedingt zusätzliche Halte. Im innerbetrieb-

lichen Bereich gibt es beispielsweise mit den Kommissionierern bereits umfangreiche Erfahrungen. In den Verkehrssystemen liegen diese Erfahrungen nur bedingt vor. Im Seeverkehr ist es beispielsweise durchaus üblich, dass beim Hafeneinlauf ein Hafenskapitän das Steuer übernimmt. Im Straßengüterverkehrssystem ist bisher der Begegnungsverkehr erprobt, wo in aller Regel der Auflieger bzw. Hänger gewechselt wird und nicht der Fahrer. Diese Systeme haben viele Vorteile wie schnelle Transferzeiten der Waren und Güter und damit die Ausweitung der produktiven Zeiten der Fahrzeuge. Zudem verbessern sich die Arbeitsbedingungen für die Fahrer, die täglich zu ihrer Niederlassung zurückkehren. In der Praxis funktioniert dies jedoch nur in großen Netzen bzw. auf paarigen Relationen und mit vertrauenswürdigen und zuverlässigen Partnern. Dies gilt nicht nur für die Pünktlichkeit, sondern insbesondere auch hinsichtlich der Ladungssicherung. Die größte Verbreitung haben diese Systeme bisher bei den großen Integratoren bzw. KEP-Dienstleistern mit standardisierten Sendungen gefunden.

Für die Umsetzung von fahrerlosen Transportketten im Straßengüterverkehr sind also neben der Frage von technischer Kompatibilität der autonomen Fahrzeuge mit der Infrastruktur und mit anderen Fahrzeugen oder auch mit Platooning-Lkw immer auch Kosten- und Haftungsfragen im Transportrecht zu klären.

Kommt es zu Schäden an der Ware oder am Fahrzeug aufgrund von Systemausfällen, könnte die Produkthaftung greifen (s. im Detail Kap. 25). Daraus folgt, dass die Fahrroboter bestehend aus Hardwarekomponenten (Sensoren, Prozessoren und Aktoren) und Softwareelementen so aufgebaut werden müssen, dass mögliche Schäden den jeweiligen Komponenten und damit deren Produzenten direkt zurechenbar sind.

18.6 Erste gesamtwirtschaftliche Einschätzungen von automatisierten Systemen in der Gütertransportkette

Auch aus gesamtwirtschaftlicher Perspektive könnten automatisierte Systeme einen Lösungsansatz für strukturelle Defizite im heutigen Verkehrswesen leisten. In Zeiten knapper öffentlicher Haushalte ist künftig nicht mit einem deutlichen Ausbau von Verkehrsinfrastruktur, insbesondere von Schiene und Binnenschiff, zu rechnen.

Mit dem automatisierten Fahren könnte die vorhandene Straßeninfrastrukturkapazität durch den geringeren Platzbedarf und durch die gleichmäßigere Geschwindigkeit mindestens verdoppelt werden. Darüber hinaus könnte ein Beitrag zum Klimaziel geleistet werden, da automatisiertes Fahren den Treibstoffverbrauch reduziert. Bereits heute leisten Fahrerassistenzsysteme (FAS) einen erheblichen Beitrag zur Reduzierung von Unfällen. Deren Anzahl könnte durch hoch- bzw. vollautomatisierte Fahrzeuge weiter verringert werden, da sie Stauenden erkennen können, riskante Überholmanöver vermeiden und auch keine Geisterfahrten unternehmen. Allerdings sind die rechtlichen Haftungsfragen, wenn es dann doch zu einem Unfall käme, noch nicht vollständig gelöst.

Im Falle des Platooning könnte im Führungsfahrzeug ein professioneller Fahrer zum Einsatz kommen, so wie es in den meisten Projekten auch angedacht ist. Dies hätte den

Vorteil, dass sich beispielsweise auch ungeübte oder weniger belastbare Langstreckenfahrer (Fahranfänger, Ältere) in eine Kolonne einordnen könnten. Dies würde jedoch bedingen, dass Güter- und Personenverkehrsfahrzeuge miteinander kommunizieren könnten.

Allerdings liefert nicht nur der Technikdeterminismus gewichtige Gründe gegen automatisierte Straßenfahrzeuge: Effizienzerhöhungen im Straßenverkehr rufen Konflikte mit den Massentransportmitteln hervor. Automatisiertes Platooning steht in direkter Konkurrenz mit der Bahn, wie zuvor schon der Lang-Lkw. Auch wenn es derzeit in Deutschland einen Berufskraftfahreremangel gibt, so würde doch die Anzahl an Berufskraftfahrern insgesamt abnehmen, und in anderen Ländern würden aus gesamtwirtschaftlicher Perspektive dringend benötigte Arbeitsplätze entfallen.

Auch die Akzeptanz der Bevölkerung ist gegenüber vollautomatisierten Systemen beschränkt – nicht zuletzt aufgrund regelmäßiger Berichte von in Fahrzeugen ausgefallenen mechanischen oder elektronischen Bauteilen oder aus Angst vor abreißenden Datenverbindungen. Autonome Fahrzeuge müssen zudem mit einer entsprechenden, zuverlässigen Software (Künstlichen Intelligenz) ausgestattet sein, die auf alle Eventualitäten reagieren kann – insbesondere dort, wo Menschen und Tiere auf den Straßen unterwegs sind.

Aus rechtlicher Perspektive stellen Fahrroboter außerhalb der Werkshallen eine Neuheit da. Bisherige FTS/FTF wurden nach der Maschinenrichtlinie behandelt, mit entsprechenden Ausgestaltungen von Sicherheits- und Personenschutzkonzepten. Eine Ausweitung des Aktionsraums (privat/öffentlich) und der Einsatzgeschwindigkeit (Schrittgeschwindigkeit bis Autobahnfahrt) der Systeme könnte neue bzw. eine Anpassung der bestehenden rechtlichen Regelungen notwendig machen.

Für den Einsatz von autonomen Fahrzeugen im Straßenverkehr wird gefordert, die rechtlichen Einschränkungen durch die „Wiener Straßenverkehrskonvention“ abzuschaffen, die vorsieht, dass ein Fahrer jederzeit die Kontrolle über sein Fahrzeug behalten müsse. Hier gibt es inzwischen eine neuere Entwicklung in den Vereinigten Staaten, deren Rechtsprechung insofern angepasst wurde, als sichergestellt ist, dass das System „can be overridden or switched off by the driver“. Sollte sich diese Rechtsauffassung auch in Europa durchsetzen, würde dies bedeuten, dass es immer eine übergeordnete Instanz geben muss, die in das Fahrzeug steuernd eingreifen kann. Im Bereich des Bahn-, See- und Luftverkehrs werden die Systeme heute schon so ausgelegt und für den Bahn- und Luftverkehr existieren akzeptierte übergeordnete Instanzen. Für den Straßengüterverkehr muss eine derartige Instanz erst geschaffen werden. Dafür muss die notwendige Akzeptanz hergestellt werden.

18.7 Fazit und Ausblick

Seit den 1960er-Jahren sind Fahrerlose Transportsysteme (FTS) in der innerbetrieblichen Logistik in Deutschland im Einsatz. Allerdings werden diese Entwicklungen weder medial noch in der Verkehrssystemforschung bisher ausreichend wahrgenommen. In der innerbetrieblichen Logistik kommen beispielsweise Transponder als Wegmarken zum Einsatz, die auch Informationen speichern können. Wenn sich Fahrzeuge im öffentlichen Raum

immer alle Umgebungsmerkmale und -besonderheiten jeder Fahrstrecke merken müssten, würden entsprechend kostenintensive Hard- und Softwaresysteme notwendig. Diese könnten vermieden werden, wenn Wegmarken bestimmte Informationen bereithielten, die nur temporär ausgelesen werden müssten. Übertragen auf das Verkehrssystem stellt sich hier die Frage, wie die Straßeninfrastruktur verändert werden müsste.

Vollautomatisiertes Fahren eröffnet die Möglichkeit, Fahrzeuge ohne menschlichen Eingriff zwischen Quelle und Ziel zu steuern. Der Fahrer übernimmt nicht nur die Stabilisierung und Bahnführung, sondern auch die Navigation und trägt damit auch die Verantwortung für die unfallfreie Fahrt.

Die Bestandsaufnahme hinsichtlich der Entwicklung autonomer Straßenverkehrssysteme hat deutlich gemacht, dass die Betrachtung von Personen- und Gütermobilität wesentlich integrierter erfolgen muss. Ebenso spannend wäre eine vertiefende Betrachtung der autonomen Systementwicklung im Bereich der anderen Verkehrsträger. Der Autopilot in Flugzeugen ist schon seit Langem die Regel. Bereits zu Beginn des 20. Jahrhunderts kamen dort Systeme zur Stabilisierung zum Einsatz. Die ersten Drohnen fliegen. Die ersten Forschungsprojekte zur unbenannten Schifffahrt auf europäischer Ebene laufen. Auch die Fernsteuerung von Eisenbahnen findet bereits seit Jahren statt. Neu ist die Qualität der autonomen Entscheidungsfindung bei veränderter Umweltsituation oder neuem bzw. verändertem Fahr- bzw. Transportauftrag. Die Ausweitung der Einsatzgebiete, beispielsweise im Luftverkehr durch die Drohnen, zeigt die Notwendigkeit auf, dass sich Transportaufträge vollkommen neu über die Verkehrsträger verteilen können. Hier besteht Forschungsbedarf.

Viele spannende Einblicke und Neuerungen wären zu erwarten, wenn das große Feld des Personenwirtschaftsverkehrs näher untersucht werden würde. Ebenso wie beim Güterverkehr geht es um Mobilität in Ausübung des Berufs. Da die Raumüberwindung nur Mittel zum Zwecke der Leistungserbringung am angefahrenen Ort ist, wird die Fortbewegung selbst in den meisten Fällen sehr viel pragmatischer betrachtet als im Individualverkehr.

Die Zusammenführung der Teilszenarien von einzelnen, autonomen logistischen Prozessen zu einem Szenario einer ganzheitlich autonomen Supply Chain bzw. Lieferkette von der automatisierten Rohstoffgewinnung, über alle Produktions- und Logistikstufen hinweg bis hin zur Belieferung des Endkunden erfordert eine integrierte Betrachtung. Technologisch wurden hier in den letzten Jahren enorme Fortschritte erzielt. Die Forschungsarbeiten müssen daher vor allem hinsichtlich des (notwendigen) Grads der Automatisierung einzelner logistischer Prozesse sowie der Feststellung von einzel- und gesamtwirtschaftlichen Nutzen und Kosten intensiviert werden.

Aufgrund der offenen rechtlichen Fragen und der fehlenden Akzeptanz innerhalb der Bevölkerung und teilweise auch unter den Unternehmensentscheidern für den Einsatz autonomer Systeme im Straßengüterverkehr (und teilweise auch in den anderen Verkehrssystemen) scheint hier nur eine schrittweise Einführung sinnvoll und realistisch. Daher wird es auf die richtige kaskadische Ausgestaltung und Implementierungsstrategie ankommen. Allerdings fehlen bisher spezifische Betrachtungen der jeweiligen Umsetzungsaspekte der skizzierten Anwendungsfälle.

Auf den ersten Blick erscheint es durchaus sinnvoll, einige der derzeit diskutierten Lösungsansätze zur Kapazitätserhöhung der Infrastruktur, Ressourcenschonung und des Umweltschutzes zu kombinieren. Der Beginn der Einführung des autonomen Fahrens in geschlossenen Systemen (beispielsweise Systemverkehren) und in überschaubaren Szenarien (z. B. Autobahn, Flughafenvorfeld, Hafen) wird Vertrauensvorbehalte und fehlende Standardisierungen überwinden helfen. Die schrittweise Umsetzung des Platooning, ausgehend von bemannten Führungs- und Folgefahrzeugen, könnte die notwendige Akzeptanz in der Bevölkerung schaffen. Zu prüfen ist, ob die gleichzeitige Einführung von Oberleitungs-Lkw und damit die Schaffung einer separaten Fahrspur unter Kapazitäts- und Sicherheitsaspekten sinnvoll wäre.

Allerdings wirft auch das Platooning mehrere Anschlussfragen auf, insbesondere hinsichtlich der Entscheidungsfindung und der Nutzenverteilung: Wenn die Kraftstoffeinsparung von der Position im Konvoi abhängig ist, wer bestimmt über den Platz in der Kette? Wenn der Konvoi ohne Fahrer in den Folgefahrzeugen fahren würde, wer bezahlt den Fahrer im Führungsfahrzeug? Braucht der Führungsfahrer eine spezielle(re) Ausbildung gegenüber den anderen Fahrern? Vor der Einführung muss aber auch geklärt werden, wie andere Platooning-Fahrzeuge identifiziert werden könnten. Dafür müsste ein gemeinsamer Standard entwickelt werden, der auch sicherstellt, dass die anderen Fahrzeuge vertrauensvoll sind. Hier greifen der weitere Forschungsbedarf und die Handlungsempfehlungen eng ineinander.

Die Veränderungen in der Supply Chain und im Güterverkehr zeigen ein sehr ambivalentes Bild, das genauer untersucht werden muss. Für das Verständnis, die Bewertung und die Einordnung ist zu klären, welche technologischen Veränderungen und Herausforderungen sich für die Fahraufgabe ergeben. Zudem gilt es, die Vor- und Nachteile des Einsatzes von automatisierten gegenüber konventionellen Fahrzeugen und deren Integrationsfähigkeit in die bestehende Arbeitsumgebung genauer zu analysieren, indem hinsichtlich verschiedener Tätigkeitsprofile von Unternehmen unterschieden wird. Bisher ist die Frage unbeantwortet, was alles autonom transportiert werden kann und welcher Autonomisierungsgrad überhaupt von der Wirtschaft hinsichtlich Notwendigkeit, Kosten und Flexibilität akzeptiert werden würde.

Gleichzeitig ergeben sich aber auch neue Möglichkeiten für innovative Geschäftsmodelle, deren Konzeptualisierung und Bewertung bisher allerdings ausstehen. Auch könnten sich Alternativen für Einsatzbereiche ergeben, deren Herausforderungen bis heute ungelöst erscheinen. Ein Beispiel ist die Ver- und Entsorgung von innerstädtischen Standorten (Stichwort „City-Logistik“), die sehr konflikträchtig und kostenintensiv ist. Der Einsatz von autonomen Straßenverkehrsfahrzeugen, gekoppelt mit weiteren Komponenten (z. B. Güterschleusen), könnte beispielsweise eine zeitliche Entzerrung der Personen- und Güterverkehrsfahrten ermöglichen.

Parallel dazu sollten jedoch auch die Chancen und Risiken der zunehmenden Automatisierung des Transports aus einer gesamtwirtschaftlichen, länderübergreifenden Perspektive genauer analysiert werden. Dazu gehören nicht nur rechtliche Fragen und Standardisierungsnotwendigkeiten, sondern auch der weitere Wegfall von Arbeitsplätzen, die

keinen höheren Bildungsabschluss voraussetzen. Hier muss eine Betrachtung von Arbeitsalternativen stattfinden. Zu wenig untersucht ist bisher auch, welche Konflikte beispielsweise zwischen dem autonomen Straßengütertransport (im Konvoi) und den Massentransportmitteln auftreten können. Zudem bedarf die Diskussion unbedingt der thematischen Erweiterung um eine ganzheitliche Umwelt- und Ressourcenbewertung.

Literatur

1. Vahrenkamp, R.: Von Taylor zu Toyota: Rationalisierungsdebatten im 20. Jahrhundert. 2. korrigierte und erw. Auflage. Josef Eul Verlag: Lohmar-Köln (2013)
2. Ullrich, G.: Fahrerlose Transportsysteme. 2. Auflage, Springer Fachmedien, Wiesbaden (2014)
3. Ullrich, G.: Effizientes Fulfillment mit Fahrerlosen Transportfahrzeugen. DS Automotion. http://www.ds-automotion.com/uploads/tx_sbdownloader/hermes.pdf (2012). Zugegriffen: 04. Juli 2014
4. Schwarz, C., Schachmanow, J., Sauer, J., Overmeyer, L., Ullmann G.: Selbstgesteuerte Fahrerlose Transportsysteme – Self Guided Vehicle Systems. *Logistics Journal* (2013). doi: 10.2195/lj_NotRev_schwarz_de_201312_01
5. Sauer, J., Ullmann, G.: Schlussbericht dem geförderten Vorhaben 17237 N. Dezentrale, agentenbasierte Selbststeuerung von Fahrerlosen Transportsystemen (FTS). Bundesvereinigung Logistik e.V.. http://www.bvl.de/files/441/481/17237_Schlussbericht_FTS-Selbststeuerung_20131002.pdf (2013). Zugegriffen: 27. Juli 2014
6. Hamburger Hafen und Logistik AG: Wer hat's erfunden? Hamburger Hafen und Logistik AG. <http://hhla.de/de/container/altenwerder-cta/das-projekt-agv.html> (2014). Zugegriffen: 02. Juli 2014
7. Dermuth, R.: Fahrerloser LKW in einer Molkerei. GÖTTING. <http://www.goetting.de/news/2012/molkerei> (2013). Zugegriffen: 02. Juli 2014
8. Kerner, S.: SaLSA – Sichere autonome Logistik- und Transportfahrzeuge. Fraunhofer IML. http://www.iml.fraunhofer.de/de/themengebiete/automation_eingebettete_systeme/Forschung/salsa.html (2014). Zugegriffen: 27. Juni 2014
9. Komatsu Ltd.: Autonomous Haul System (AHS). Komatsu Ltd. <http://www.komatsu.com.au/AboutKomatsu/Technology/Pages/AHS.aspx>(2005). Zugegriffen: 02. Juli 2014
10. Wirth, N.: Zivile Drohnen heben ab – auch an der Börse? Trendlink.com. http://www.trendlink.com/aktienanalysen/aktien/zivile_Drohnen/78-Zivile_Drohnen_heben_ab_-_auch_an_der_Borse (2014). Zugegriffen: 22. Juli 2014
11. Hegmann, G.: Rolls Royce glaubt fest an Drohnenschiffe. Welt.de. <http://www.welt.de/wirtschaft/article123352845/Rolls-Royce-glaubt-fest-an-Drohnenschiffe.html> (2013). Zugegriffen: 30. Juli 2014
12. Böcker, J., Henke, C., Rustemeier, C., Schneider, T., Trächtler A.: Rail Cab – Ein Schienenverkehrssystem mit autonomen, Linearmotor getriebenen Einzelfahrzeugen. Universität Paderborn. http://www.lea.uni-paderborn.de/fileadmin/Elektrotechnik/AG-LEA/forschung/veroeffentlichungen/2007/07ETG_Henke_Rustemeier_Schneider_Boecker_Traechtler.pdf (2007). Zugegriffen: 30. Juli 2014
13. Donges, E. 1982. Aspekte der Aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen. *Automobil-Industrie*, 2, S. 183–190
14. Gasser, T.M.: Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung. *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen* 83. (2012)
15. Brünglinghaus, C.: Scania erforscht das automatisierte Lkw-Kolonnenfahren. Springer für Professionals. <http://www.springerprofessional.de/scania-erforscht-das-automatisierte-lkw-kolonnenfahren/4909638.html> (2014). Zugegriffen: 04. Juli 2014

16. Grünweg, T.: Autonom fahrender Lkw: Laster ohne Lenker. Spiegel Online. <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/autonome-lkw-neue-technik-soll-fernfahrer-entlasten-und-sprit-sparen-a-978960.html> (2014). Zugegriffen: 04. Juli 2014
17. Tsugawa, S.: Energy ITS: What We Learned and What We should Learn. Onlinepubs.trb.org. <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/conferences/2012/Automation/presentations/Tsugawa.pdf> (2012). Zugegriffen: 30. Juli 2014
18. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.): Abschlussbericht zum Verbundvorhaben Erprobung nutzfahrzeugspezifischer E-Mobilität – EmiL. erneuerbar-mobil.de. <http://www.erneuerbar-mobil.de/de/projekte/foerderprojekte-aus-dem-konjunkturpaket-ii-2009-2011/wirtschaftsverkehr-feldversuche/abschlussberichte-wirtschaftsverkehr/abschlussbericht-emil.pdf> (2011). Zugegriffen: 02. Juli 2014
19. Bieber/Deiß 2000 Bieber, D.: Schnittstellenoptimierung in der Distributionslogistik: innovative Dienstleistungen in der Wertschöpfungskette. SSOAR. http://www.ssoar.info/ssoar/bitstream/handle/document/9993/ssoar-2000-bieber_et_al-schnittstellenoptimierung_in_der_distributionslogistik.pdf (2000) Zugegriffen: 17. Juli 2014
20. Daimler AG: Weltpremiere: Daimler Trucks präsentiert mit autonom fahrenden „Mercedes-Benz Future Truck 2025“ den Lkw der Zukunft. daimler.com. http://www.daimler.com/Projects/c2c/channel/documents/2495102_Daimler_IRRelease_03072014_de.pdf (2014). Zugegriffen: 04. Juli 2014

Marco Pavone

Content

19.1 Introduction	400
19.1.1 Overview	400
19.1.2 Personal urban mobility in the 21st century	400
19.1.3 The rise of mobility-on-demand (MoD)	401
19.1.4 Beyond MoD: autonomous mobility-on-demand (AMoD)	401
19.1.5 Chapter contributions	402
19.2 Modeling and controlling AMoD systems	403
19.2.1 Spatial queueing model of AMoD systems	403
19.2.2 Approaches for controlling AMoD systems	404
19.2.3 Comparison	407
19.3 Evaluating AMoD systems	407
19.3.1 Case Study I: AMoD in New York City	408
19.3.2 Case Study II: AMoD in Singapore	409
19.4 Future research directions	412
19.4.1 Future research on modeling and control	412
19.4.2 Future research on AMoD evaluation	414
19.5 Conclusions	414
19.5.1 Acknowledgments	415
References	415

M. Pavone (✉)
Stanford University, Department of Aeronautics and Astronautics, USA
pavone@stanford.edu

19.1 Introduction

19.1.1 Overview

This chapter discusses the operational and economic aspects of autonomous mobility-on-demand (AMoD) systems, a transformative and rapidly developing mode of transportation wherein robotic, self-driving vehicles transport passengers in a given environment. Specifically, AMoD systems are addressed along three dimensions: (1) modeling, that is analytical models capturing salient dynamic and stochastic features of customer demand, (2) control, that is coordination algorithms for the vehicles aimed at throughput maximization, and (3) economic, that is fleet sizing and financial analyses for case studies of New York City and Singapore. Collectively, the models and methods presented in this chapter enable a rigorous assessment of the *value* of AMoD systems. In particular, the case study of New York City shows that the current taxi demand in Manhattan can be met with about 8,000 robotic vehicles (roughly 70 percent of the size of the current taxi fleet), while the case study of Singapore suggests that an AMoD system can meet the personal mobility needs of the *entire* population of Singapore with a number of robotic vehicles roughly equal to 1/3 of the current number of passenger vehicles. Directions for future research on AMoD systems are presented and discussed.

19.1.2 Personal urban mobility in the 21st century

In the past century, *private* automobiles have dramatically changed the paradigm of *personal urban mobility* by enabling *fast* and *anytime* point-to-point travel within cities. However, this paradigm is currently challenged due to a combination of factors such as dependency on oil, tailpipe production of greenhouse gases, reduced throughput caused by congestion, and ever-increasing demands on urban land for parking spaces [1]. In the US, urban vehicles consume more than half of the oil consumed by *all* sectors [2], and produce 20 percent of the total carbon dioxide emissions [3, 4]. Congestion has soared dramatically in the recent past, due to the fact that construction of new roads has not kept up with increasing transportation demand [5]. In 2011, congestion in metropolitan areas increased urban Americans' travel times by 5.5 billion hours (causing a 1 percent loss of US GDP [6]), and this figure is projected to increase by 50 percent by 2020 [6]. Parking compounds the congestion problem, by causing additional congestion and by competing for urban land for other uses. The problem is even worse on a global scale, due to the combined impact of rapid increases in urban population (to reach 5 billion, more than 60 percent of the world population, by 2030 [7]), worldwide urban population density, and car ownership in developing countries [1]. As a result, private automobiles are widely recognized as an *unsustainable solution for the future of personal urban mobility* [1].

19.1.3 The rise of mobility-on-demand (MoD)

The challenge is to ensure the same benefits of privately-owned cars while removing dependency on non-renewable resources, minimizing pollution, and avoiding the need for additional roads and parking spaces. A lead to a solution for this problem comes from realizing that most of the vehicles used in urban environments are *overengineered* and *underutilized*. For example, a typical automobile can attain speeds well over 100 miles per hour, whereas urban driving speeds are typically slow (in the 15- to 25-miles per hour range [5, 8]). Furthermore, private automobiles are parked more than 90 percent of the time [5]. Within this context, one of the most promising strategies for future personal urban mobility is the concept of *one-way vehicle sharing* using small-sized, electric cars (referred to as mobility-on-demand, or MoD), which provides stacks and racks of light electric vehicles at closely spaced intervals throughout a city [1]: when a person wants to go somewhere, she/he simply walks to the nearest rack, swipes a card to pick up a vehicle, drives it to the rack nearest to the selected destination, and drops it off.

MoD systems with electric vehicles directly target the problems of oil dependency (assuming electricity is produced cleanly), pollution, and parking spaces via higher utilization rates. Furthermore, they ensure more flexibility with respect to two-way rental systems, and provide *personal, anytime* mobility, in contrast to traditional taxi systems or alternative one-way ridesharing concepts such as carpooling, vanpooling, and buses. As such, MoD systems have been advocated as a key step toward sustainable *personal* urban mobility in the 21st century [1], and the very recent success of Car2Go (a one-way rental company operating over 10,000 two-passenger vehicles in 26 cities worldwide [9]) seems to corroborate this statement (see Figure 19.1, left).

MoD systems, however, present a number of limitations. For example, due to the spatio-temporal nature of urban mobility, trip origins and destinations are unevenly distributed and as a consequence MoD systems inevitably tend to become *unbalanced*: Vehicles will build up in some parts of a city, and become depleted at others. Additionally, MoD systems do *not* directly contribute to a reduction of congestion, as the *same* number of vehicle miles would be traveled (indeed more, considering trips to rebalance the vehicles) with the *same* origin-destination distribution.

19.1.4 Beyond MoD: autonomous mobility-on-demand (AMoD)

The progress made in the field of autonomous driving in the past decade might offer a solution to these issues. Autonomous driving holds great promise for MoD systems because robotic vehicles can rebalance themselves (eliminating the rebalancing problem at its core), autonomously reach charging stations when needed, and enable system-wide coordination aimed at throughput optimization. Furthermore, they would free passengers from the task of driving, provide a personal mobility option to people unable or unwilling to drive, and potentially increase safety. These benefits have recently prompted a number of



Fig. 19.1 Left figure: A Car2Go vehicle used in a traditional (i.e., non-robotic) MoD system. Right figure: Self-driving vehicle that Google will use in a 100-vehicle AMoD pilot project within the next two years. Image credit: Car2Go and Google.

companies and traditional car manufacturers to aggressively pursue the “AMoD technology,” with activities ranging from the design of vehicles specifically tailored to AMoD operations [10, 11], to the expected launch by Google of a 100-vehicle AMoD pilot project within the next two years [12] (see Figure 19.1, right).

Rapid advances in vehicle automation technologies coupled with the increased economic and societal interest in MoD systems have fueled heated debates about the potential of AMoD systems and their economic and societal value. How many robotic vehicles would be needed to achieve a certain quality of service? What would be the cost of their operation? Would AMoD systems decrease congestion? In general, do AMoD systems represent an economically viable, sustainable, and societally-acceptable solution to the future of personal urban mobility?

19.1.5 Chapter contributions

To answer the above questions, one needs to first understand how to *control* AMoD systems, which entails optimally routing in real-time potentially hundreds of thousands of robotic vehicles. Such routing process must take into account the spatiotemporal variability of mobility demand, together with a number of constraints such as congestion and battery recharging. This represents a networked, heterogeneous, stochastic decision problem with uncertain information, hence complexity is at its heart. Within this context, the contribution of this chapter is threefold:

1. We present a spatial queueing-theoretical model for AMoD systems capturing salient dynamic and stochastic features of customer demand. A spatial queueing model entails an exogenous dynamical process that generates “transportation requests” at *spatially-localized* queues.

2. We outline two recent, yet promising approaches for the analysis and control of AMoD systems, which leverage the aforementioned spatial queueing-theoretical model. The first approach, referred to as “lumped” approach, exploits the theory of Jackson networks and allows the computation of key performance metrics and the design of system-wide coordination algorithms. The second approach, referred to as “distributed” approach, transforms the problem of controlling a set of spatially-localized queues into one of controlling a single “spatially-averaged” queue and allows the determination of *analytical* scaling laws that can be used to select system parameters (e.g., fleet sizing).
3. We discuss two case studies for the deployment of AMoD systems in New York City and Singapore. These case studies suggest that it is much more affordable (and convenient) to access mobility in an AMoD system compared to traditional mobility systems based on private vehicle ownership.

The chapter concludes with a discussion about future directions for research, with a preliminary discussion about the potential of AMoD systems to *decrease* congestion. The results presented in this chapter build upon a number of previous works by the author and his collaborators, namely [13] for the lumped approach, [14, 15, 16, 17] for the spatial queueing-theoretical framework and the distributed approach, and [13, 18] for the case studies.

The rest of this chapter is structured as follows. Section 19.2 presents a spatial queueing model for AMoD systems and gives an overview of two complementary approaches to control AMoD systems, namely, the lumped approach and the distributed approach. Section 19.3 leverages analysis and control synthesis tools from Section 19.2 to provide an initial *evaluation* of AMoD systems for two case studies of New York City and Singapore. Section 19.4 outlines directions for future research, with a particular emphasis on (and some preliminary results for) congestion effects. Finally, Section 19.5 concludes the chapter.

19.2 Modeling and controlling AMoD systems

19.2.1 Spatial queueing model of AMoD systems

At a high level, an AMoD system can be mathematically modeled as follows. Consider a given environment, where a fleet of self-driving vehicles fulfills transportation requests. Transportation requests arrive according to an *exogenous dynamical process* with associated origin and destination locations within the environment. The transportation request arrival process and the spatial distribution of the origin-destination pairs are modeled as stochastic processes, leading to a probabilistic analysis. Transportation requests queue up within the environment, which gives rise to a network of *spatially-localized* queues dynamically served by the self-driving vehicles. Such network is referred to as “spatial queueing system.” Performance criteria include the availability of vehicles upon the request’s arrival

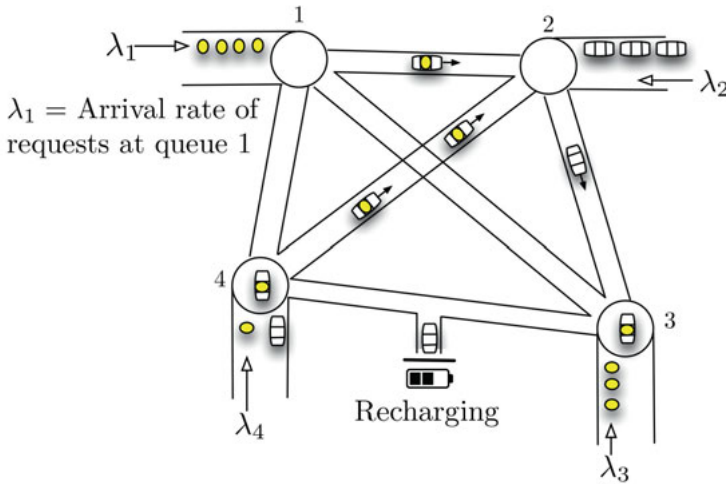


Fig. 19.2 A spatial queuing model of an AMoD system entails an exogenous dynamical process that generates “transportation requests” (yellow dots) at *spatially-localized* queues. Self-driving vehicles (represented by small car icons) travel among such locations according to a given network topology to transport passengers.

(i.e., the probability that at least one vehicle is available to provide immediate service) or average wait times to receive service. The model is portrayed in Figure 19.2.

Controlling a spatial queuing system involves a *joint task allocation and scheduling problem*, whereby vehicle routes should be dynamically designed to allocate vehicles to transportation requests so as to minimize, for example, wait times. In such a dynamic and stochastic setup, one needs to design a *closed-loop control policy*, as opposed to open-loop preplanned routes. The problem combines aspects of networked control, queuing theory, combinatorial optimization, and geometric probability (i.e., probabilistic analysis in a geometrical setting). This *precludes* the direct application of “traditional” queuing theory due to the complexity added by the spatial component (these complexities include, for example, congestion effects on network edges, energy constraints, and statistical couplings induced by the vehicles’ motion [17, 19, 20]). It also precludes the direct application of combinatorial static optimization, as the dynamic aspect of the problem implies that the problem instance is *incrementally revealed over time* and static methods can no longer be applied. As a consequence, researchers have devised a number of alternative approaches, as detailed in the next section.

19.2.2 Approaches for controlling AMoD systems

This section presents two recent, yet promising approaches for the control of spatial queuing systems as models for AMoD systems, namely the lumped approach and the distributed approach. Both approaches employ a number of relaxations and approximations to

overcome the difficulties in directly applying results from queueing (network) theory to spatial queueing models. A remarkable feature of these approaches is that they yield *formal performance bounds* for the control policies (i.e., factor of sub-optimality) and scaling laws for the quality of service in terms of model data, which can provide useful guidelines for selecting system parameters (e.g., number of vehicles). These approaches take their origin from seminal works on hypercube models for spatial queues [19], on the Dynamic Traveling Repairman problem [20, 21, 22, 23], and on the Dynamic Traffic Assignment problem [24, 25].

Alternative approaches could be developed by leveraging *worst-case* (as opposed to stochastic) techniques for dynamic vehicle routing, e.g., competitive (online) analysis [26, 27, 28]. This is an interesting direction for future research.

19.2.2.1 Lumped approach

Within the lumped approach [13], transportation requests are modeled by assuming that customers arrive at a set of stations located within a given environment¹, similar to the hypercube model [19]. The arrival process at each station is Poisson with a rate λ_i , where $i \in \{1, \dots, N\}$ and N denotes the number of stations. (Reasonable deviations from the assumption of Poisson arrivals have been found not to substantially alter the predictive accuracy of these models [19].) Upon arrival, a customer at station i selects a destination j according to a probability mass function $\{p_{ij}\}$ (Figure 19.3, left). If vehicles are parked at station i , the customer takes a vehicle and is driven to the intended destination, with a travel time modeled as a random variable T_{ij} . However, if the station is empty of vehicles, the customer immediately leaves the system. Under the assumptions of Poisson arrivals and exponentially-distributed travel times, an AMoD system is then translated into a Jackson network model through an *abstraction procedure* [13, 29], whereby one identifies the stations with single-server queues and the roads with infinite-server queues. (Jackson networks are a class of queueing networks where the equilibrium distribution is particularly simple to compute as the network has a product-form solution [30, 31]). With this identification, an AMoD system becomes a *closed Jackson network with respect to the vehicles*, which is amenable to *analytical* treatment [13] (Figure 19.3, left).

To control the network, for example, to (autonomously) rebalance the vehicles to ensure even vehicle availability, the strategy is to add *virtual customer streams* [13]. Specifically, one assumes that each station i generates “virtual customers” according to a Poisson process with rate ψ_i , and routes these virtual customers to station j with probability α_{ij} . The problem of controlling an AMoD system becomes one of optimizing over the rates $\{\psi_i\}$ and probabilities $\{\alpha_{ij}\}$ which, by exploiting the theory of Jackson networks,

¹ Alternatively, to model an AMoD system where the vehicles directly pick up the customers, one would decompose a city into N disjoint *regions* Q_1, Q_2, \dots, Q_N . Such regions would replace the notion of stations. When a customer arrives in region Q_i , destined for Q_j , a free vehicle in Q_i is sent to pick up and drop off the customer before parking at the median of Q_j . The two models are then formally *identical* and follow the same mathematical treatment.

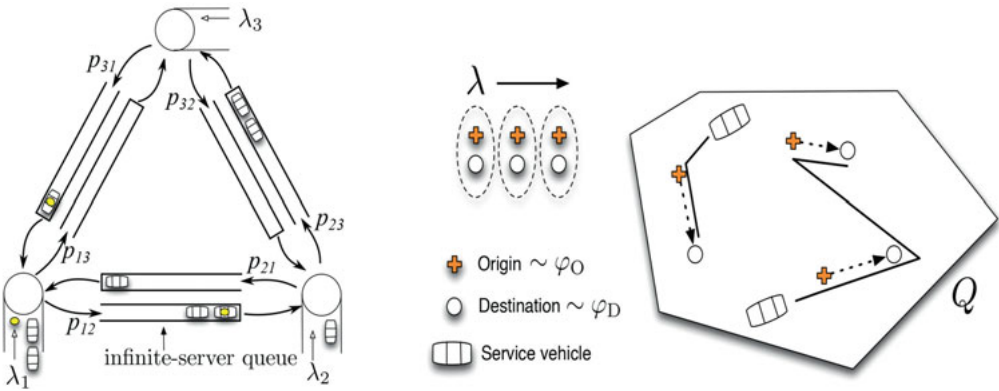


Fig. 19.3 Left figure: In the lumped model, an AMoD system is modeled as a Jackson network, where stations are identified with single-server queues and roads are identified with infinite-server queues. (Customers are denoted with yellow dots and servicing vehicles are represented by small car icons.) Some vehicles travel without passengers to rebalance the fleet. Right figure: In a distributed model of an AMoD system, a stochastic process with rate λ generates origin-destination pairs, distributed over a *continuous* domain Q .

can be cast as a *linear program* (hence, this approach extends well to *large* transportation networks). This method *encourages* coordination but does *not* enforce it, which is the key to maintaining tractability of the model [13]. The rates $\{\psi_i\}$ and probabilities $\{\alpha_{ij}\}$ are then used as *feedforward reference signals* in a receding horizon control scheme to control in real-time an entire AMoD system [13], as done for case studies of New York City and Singapore presented in Section 19.3.

19.2.2.2 Distributed approach

The key idea behind the distributed approach [14, 15, 16, 17] is that the number of stations represents a continuum (i.e., $N \rightarrow \infty$), similar to the Dynamic Traveling Repairman problem [20, 21, 22, 23]. In other words, customers arrive at any point in a given bounded environment [15, 16], or at any point along the segments of a road map [15]. In the simplest scenario, a dynamical process generates spatially-localized origin-destination pairs (representing the transportation requests) in a geographical region $Q \subset \mathbb{R}^2$. The process that generates origin-destination pairs is modeled as a spatio-temporal Poisson process, namely, (i) the time between consecutive generation instants has an exponential distribution with intensity λ , and (ii) origins and destinations are random variables with probability density functions, respectively, φ_O and φ_D , supported over Q , see Figure 19.3 (right). The objective is to design a routing policy that minimizes the average steady-state time delay between the generation of an origin-destination pair and the time the trip is completed. By removing the constraint that customers' origin-destination pairs are localized at a finite set of points in an environment, one transforms the problem of controlling N different queues into one of controlling a single “spatially-averaged” queue. This considerably simplifies analysis and control, and allows one to derive *analytical* expressions for important design parame-

ters. For example, one can show that a necessary *and* sufficient condition for stability is that the load factor

$$\rho := \lambda [E_{\varphi_O \varphi_D} [Y - X] + \text{EMD}(\varphi_O, \varphi_D)] / (vm) \quad (19.1)$$

is *strictly* less than one, where m is the number of servicing vehicles, v is the average speed of the vehicles, $E_{\varphi_O \varphi_D} [Y - X]$ is the expected distance between origin and destination locations, and $\text{EMD}(\varphi_O, \varphi_D)$ is the earth mover's distance between densities φ_O and φ_D [32], representing the minimum distance, on average, a vehicle must travel to realign itself with an *asymmetrical* travel demand [16]. Intuitively, if distributions φ_O and φ_D are imagined as describing two piles each consisting of a unit of "dirt" (i.e., earth), then $\text{EMD}(\varphi_O, \varphi_D)$ can be thought of as the minimum work (dirt \times distance) required to reshape φ_O into φ_D (see [32] for a formal definition). One can use the above formula to estimate the required fleet size to ensure stability – an example application to a case study of Singapore is presented in Section 19.3. With this approach, it is also possible to obtain formal performance bounds (i.e., factors of sub-optimality) for receding horizon control policies, in the *asymptotic* regimes $\rho \rightarrow 1^-$ (heavy-load, system saturated) and $\rho \rightarrow 0^+$ (light-load, system empty of customers) [33, 17].

19.2.3 Comparison

The lumped approach and the distributed approach are *complementary* in a number of ways. Both models provide *formal guarantees* for stability and performance. The former is more realistic (a road topology can be readily mapped into this model) and provides a natural pathway to synthesize control policies. The latter provides significant mathematical simplifications (as one only needs to study a spatially-averaged queue) and enables the determination of *analytical* scaling laws that can be used to select system parameters (e.g., fleet sizing). In the next section we exploit the interplay between these two approaches to characterize AMoD systems for case studies of New York City and Singapore.

Both approaches appear to be promising tools to systematically tackle the problem of system-wide control of AMoD systems. Several research questions, however, still need to be addressed to fulfill this objective, particularly with respect to inclusion of congestion effects (in Section 19.2.2.1, roads are modeled as infinite server queues, so the travel time for each vehicle is independent of all other vehicles), predictive accuracy, and control synthesis for complex scenarios, as detailed in Section 19.4.

19.3 Evaluating AMoD systems

Leveraging models and methods from Section 19.2, this section studies hypothetical deployments of AMoD systems in two major cities, namely New York City and Singapore.

Collectively, the results presented in this section provide a preliminary, yet rigorous evaluation of the benefits of AMoD systems based on real-world data. We mention that both case studies do not consider congestion effects – a preliminary discussion about these effects is presented in Section 19.4.

19.3.1 Case Study I: AMoD in New York City

This case study applies the lumped approach to characterize how many self-driving vehicles in an AMoD system would be required to replace the current fleet of taxis in Manhattan while providing quality service at current customer demand levels [13]. In 2012, over 13,300 taxis in New York City made over 15 million trips a month or 500,000 trips a day, with around 85 percent of trips within Manhattan. The study uses taxi trip data collected on March 1, 2012 (the data is courtesy of the New York City Taxi & Limousine Commission) consisting of 439,950 trips within Manhattan. First, trip origins and destinations are clustered into $N = 100$ stations, so that a customer is on average less than 300 m from the nearest station, or approximately a 3-minute walk. The system parameters such as arrival rates $\{\lambda_i\}$, destination preferences $\{p_{ij}\}$ and travel times $\{T_{ij}\}$ are estimated for each hour of the day using trip data between each pair of stations.

Vehicle availability (i.e., probability of finding a vehicle when walking to a station) is calculated for three cases – peak demand (29,485 demands/hour, 7–8 pm), low demand (1,982 demands/hour, 4–5 am), and average demand (16,930 demands/hour, 4–5 pm). For each case, vehicle availability is calculated by solving the linear program discussed in Section 19.2.2.1 and then applying mean value analysis [29] techniques to recover vehicle availabilities. (The interested reader is referred to [13] for further details). The results are summarized in Figure 19.4.

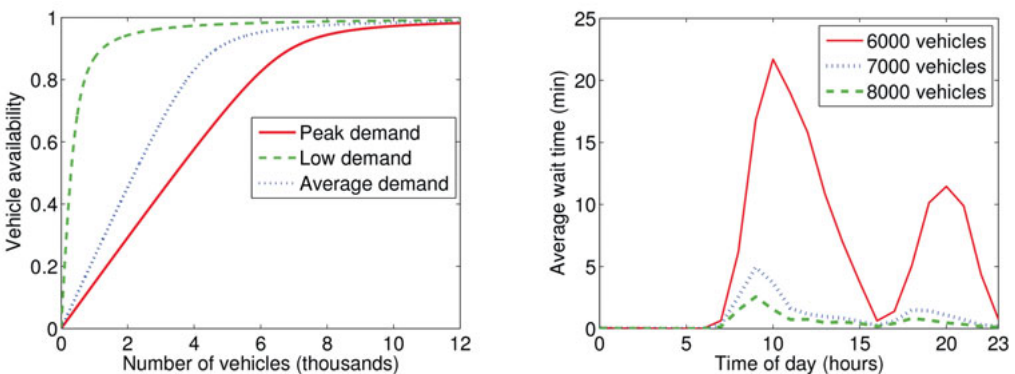


Fig. 19.4 Case study of New York City [13]. Left figure: Vehicle availability as a function of system size for 100 stations in Manhattan. Availability is calculated for peak demand (7–8 pm), low demand (4–5 am), and average demand (4–5 pm). Right figure: Average customer wait times over the course of a day, for systems of different sizes.

For high vehicle availability (say, 95 percent), one would need around 8,000 vehicles (~70 percent of the current fleet size operating in Manhattan, which, based on taxi trip data, we approximate as 85 percent of the total taxi fleet) at peak demand and 6,000 vehicles at average demand. This suggests that an AMoD system with 8,000 vehicles would be able to meet 95 percent of the taxi demand in Manhattan, assuming 5 percent of customers are impatient and leave the system when a vehicle is not immediately available. However, in a real system, customers would wait in line for the next vehicle rather than leave the system, thus it is important to determine how vehicle availability relates to customer waiting times. Customer waiting times are characterized through simulation, using the receding horizon control scheme mentioned in Section 19.2.2.1. The time-varying system parameters λ_i , p_{ij} , and average speed are piecewise constant, and change each hour based on values estimated from the taxi data. Travel times T_{ij} are based on average speed and Manhattan distance between stations i and j , and self-driving vehicle rebalancing is performed every 15 minutes. Three sets of simulations are performed for 6,000, 7,000, and 8,000 vehicles, and the resulting average waiting times are shown in Figure 19.4 (right). Specifically, Figure 19.4 (right) shows that for a 7,000 vehicle fleet the peak averaged wait time is less than 5 minutes (9–10 am) and, for 8,000 vehicles, the average wait time is only 2.5 minutes. The simulation results show that high availability (90–95 percent) does indeed correspond to low customer wait time and that an AMoD system with 7,000 to 8,000 vehicles (roughly 70 percent of the size of the current taxi fleet) can provide adequate service with current taxi demand levels in Manhattan.

19.3.2 Case Study II: AMoD in Singapore

This case study discusses an hypothetical deployment of an AMoD system to meet the personal mobility needs of the *entire* population of Singapore [18]. The study, which should be interpreted as a thought experiment to investigate the potential benefits of an AMoD solution, addresses three main dimensions: (i) minimum fleet size to ensure system stability (i.e., uniform boundedness of the number of outstanding customers), (ii) fleet size to provide acceptable quality of service at current customer demand levels, and (iii) financial estimates to assess economic feasibility. To support the analysis, three complementary data sources are used, namely the 2008 Household Interview Travel Survey – HITS – (a comprehensive survey about transportation patterns conducted by the Land Transport Authority in 2008 [34]), the Singapore Taxi Data – STD – database (a database of taxi records collected over the course of a week in Singapore in 2012) and the Singapore Road Network – SRD – (a graph-based representation of Singapore’s road network).

19.3.2.1 Minimum fleet sizing

The minimum fleet size needed to ensure stability is computed by applying equation (19.1), which was derived within the distributed approach. The first step is to process the HITS, STD, and SRD data sources to estimate the arrival rate λ , the average origin-

destination distance $E_{\varphi_O \varphi_D} [Y - X]$, the demand distributions φ_O and φ_D , and the average velocity v . Given such quantities, equation (19.1) yields that at least 92,693 self-driving vehicles are required to ensure the transportation demand remains uniformly bounded. To gain an appreciation for the level of vehicle sharing possible in an AMoD system of this size, consider that at 1,144,400 households in Singapore, there would be roughly one shared car every 12.3 households. Note, however, that this should only be seen as a lower bound on the fleet size, since customer waiting times would be unacceptably high.

19.3.2.2 Fleet sizing for acceptable quality of service

To ensure acceptable quality of service, one needs to increase the fleet size. To characterize such increase, we use the same techniques outlined in Section 19.3.1, which rely on the lumped approach. Vehicle availability is analyzed in two representative cases. The first is chosen as the 2–3 pm bin, since it is the one that is the closest to the “average” traffic condition. The second case considers the 7–8 am rush-hour peak. Results are summarized in Figure 19.5 (left). With about 200,000 vehicles, availability is about 90 percent on average, but drops to about 50 percent at peak times. With 300,000 vehicles in the fleet, availability is about 95 percent on average and about 72 percent at peak times. As in Section 19.3.1, waiting times are characterized through simulation. For 250,000 vehicles, the maximum wait time during peak hours is around 30 minutes, which is comparable with typical congestion delays during rush hour. With 300,000 vehicles, peak wait times are reduced to less than 15 minutes, see Figure 19.5 (right). To put these numbers into perspective, in 2011 there were 779,890 passenger vehicles operating in Singapore [35]. Hence, this case study suggests that an AMoD system can meet the personal mobility need of the entire population of Singapore with a number of robotic vehicles roughly equal to 1/3 of the current number of passenger vehicles.

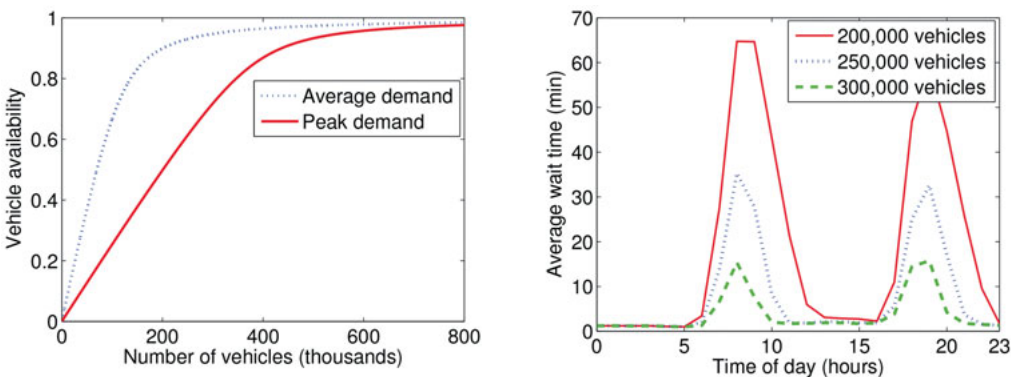


Fig. 19.5 Case study of Singapore [18]. Left figure: Performance curve with 100 regions, showing the availability of vehicles vs. the size of the system for both average demand (2–3 pm) and peak demand (7–8 am). Right figure: Average wait times over the course of a day, for systems of different sizes.

19.3.2.3 Financial analysis of AMoD systems

This section provides a preliminary, yet rigorous economic evaluation of AMoD systems. Specifically, this section characterizes the total mobility cost (TMC) for users in two competing transportation models. In System 1 (referred to as *traditional system*), users access personal mobility by purchasing (or leasing) a private, human-driven vehicle. Conversely, in System 2 (the AMoD system), users access personal mobility by subscribing to a shared AMoD fleet of vehicles. For both systems, the analysis considers not only the explicit costs of access to mobility (referred to as cost of service -COS-), but also hidden costs attributed to the time invested in various mobility-related activities (referred to as cost of time – COT –). A subscript $i = \{1, 2\}$ will denote the system under consideration (e.g., COS_1 denotes the COS for System 1).

Cost of service: The cost of service is defined as the sum of all explicit costs associated with accessing mobility. For example, in System 1, COS_1 reflects the costs to individually purchase, service, park, insure, and fuel a private, human-driven vehicle, which, for the case of Singapore, are estimated for a mid-size car at \$18,162/year. For System 2, one needs to make an educated guess for the cost incurred in retrofitting production vehicles with the sensors, actuators, and computational power required for automated driving. Based upon the author's and his collaborators' experience on self-driving vehicles, such cost (assuming some economies of scale for large fleets) is estimated as a one-time fee of \$15,000. From the fleet-sizing arguments of Section 19.3.2.2, one shared self-driving vehicle in System 2 can effectively serve the role of about four private, human-driven vehicles in System 1, which implies an estimate of 2.5 years for the average lifespan of a self-driving vehicle. Tallying the aforementioned costs on a fleet-wide scale and distributing the sum evenly among the entire Singapore population gives a COS_2 of \$12,563/year (see [18] for further details about the cost breakdown). According to COS values, it is more affordable to access mobility in System 2 than System 1.

Cost of time: To monetize the hidden costs attributed to the time invested in mobility-related activities, the analysis leverages the Value of Travel Time Savings (VTTS) numbers laid out by the Department of Transportation for performing a cost-benefit analysis of transportation scenarios in the US [36]. Applying the appropriate VTTS values based on actual driving patterns gives $COT_1 = \$14,460/\text{year}$ (which considers an estimated 747 hours/year spent by vehicle owners in Singapore in mobility-related activities, see [18]). To compute COT_2 , this analysis prices sitting comfortably in a shared self-driving vehicle while being able to work, read, or simply relax at 20 percent of the median wage (as opposed to 50 percent of the median wage which is the cost of time for driving in free-flowing traffic). Coupling this figure with the fact that a user would spend no time parking, limited time walking to and from the vehicles, and roughly 5 minutes for a requested vehicle to show up (see Section 19.3.2.2), the end result is a COT_2 equal to \$4,959/year.

Total mobility cost: A summary of the COS, COT, and TMC for the traditional and AMoD systems is provided in Table 19.1 (note that the average Singaporean drives 18,997 km in a year). Remarkably, combining COS and COT figures, the *TMC for AMoD systems is roughly half of that for traditional systems*. To put this into perspective, these savings

Table 19.1 Summary of the financial analysis of mobility-related cost for traditional and AMoD systems for a case study of Singapore [18].

	Cost [USD/km]			Yearly cost [USD/year]		
	COS	COT	TMC	COS	COT	TMC
Traditional	0.96	0.76	1.72	18,162	14,460	32,622
AMoD	0.66	0.26	0.92	12,563	4,959	17,522

represent about one third of GDP per capita. Hence, this analysis suggests that it is much more affordable to access mobility in an AMoD system compared to traditional mobility systems based on private vehicle ownership.

19.4 Future research directions

This chapter provided an overview of modeling and control techniques for AMoD systems, and a preliminary evaluation of their financial benefits. Future research on this topic should proceed along two main dimensions: efficient control algorithms for increasingly more realistic models and eventually for real-world test beds, and financial analyses for a larger number of deployment options and accounting for positive externalities (e.g., increased safety) in the economic assessment. Such research directions are discussed in some details next, with a particular emphasis on the inclusion of congestion effects and some related preliminary results.

19.4.1 Future research on modeling and control

A key direction for future research is the inclusion of congestion effects. In AMoD systems, congestion manifests itself as constraints on the road capacity, which in turn affect travel times throughout the system. To include congestion effects, a promising strategy is to study a modified lumped model whereby the infinite-server road queues are changed to queues with a *finite* number of servers, where the number of servers on each road represents the *capacity* of that road [13]. This approach is used in Figure 19.6 on a simple 9-station road network, where the aim is to illustrate the impact of autonomously rebalancing vehicles on congestion. Specifically, the stations are placed on a square grid, and joined by 2-way road segments, each of which is 0.5 km long. Each road consists of a single lane, with a critical density of 80 vehicles/km. Each vehicle travels at 30 km/hour in free flow, which means the travel time along each road segment is 1 minute in free flow. Figure 19.6 plots the vehicle and road utilization increases due to rebalancing for 500 randomly generated systems (where the arrival rates and routing distributions are randomly generated). The routing algorithm for the rebalancing vehicles is a simple open-loop strategy based on the

linear program discussed in Section 19.2.2.1. The x-axis shows the ratio of rebalancing vehicles to passenger vehicles on the road, which represents the inherent imbalance in the system. The red data points represent the increase in average road utilization due to rebalancing and the blue data points represent the utilization increase in the most congested road segment due to rebalancing. It is no surprise that the average road utilization rate is a linear function of the number of rebalancing vehicles. However, remarkably, the maximum congestion increases are much lower than the average, and are in most cases zero. This means that while rebalancing generally increases the number of vehicles on the road, *rebalancing vehicles mostly travel along less congested routes and rarely increase the maximum congestion in the system*. This can be seen in Figure 19.6 bottom left, where rebalancing clearly increases the number of vehicles on many roads but not on the most congested road segment (from station 6 to station 5).

The simple setup in Figure 19.6 suggests that AMoD systems would, in general, not lead to an increase in congestion. A particularly interesting and intriguing research direction is to devise routing algorithms for AMoD systems that indeed lead to a *decrease* in congestion with current demand levels (or even higher). A promising strategy relies on the idea that if AMoD systems are implemented such that passengers are given precise pickup times and trips are staggered to avoid too many trips at the same time, congestion may be reduced. Passengers may still spend the same amount of time between requesting a vehicle and

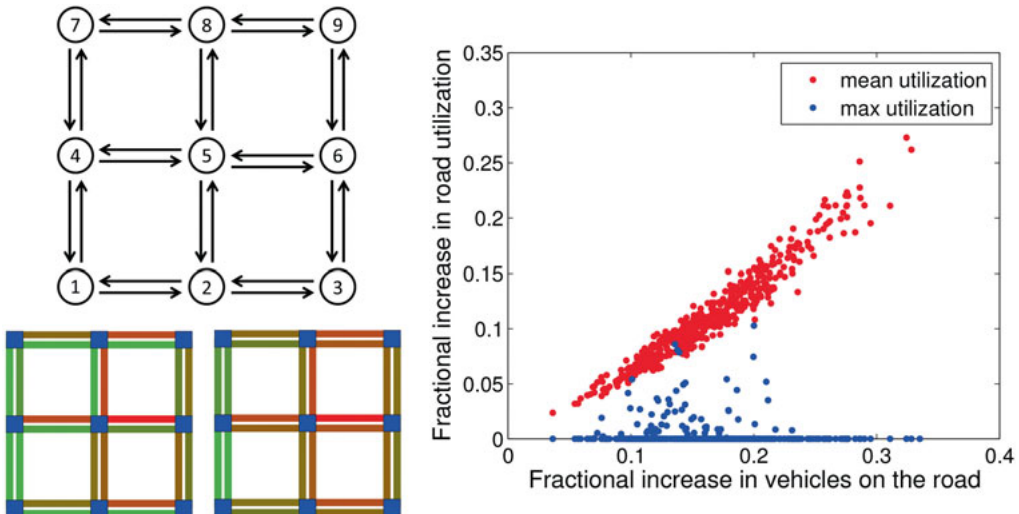


Fig. 19.6 Congestion effects in AMoD systems [13]. Top left: Layout of the 9-station road network. Each road segment has a capacity of 40 vehicles in each direction. Bottom left: The first picture shows the 9-station road network without rebalancing. The color on each road segment indicates the level of congestion, where green is no congestion, and red is heavy congestion. The second picture is the same road network with rebalancing vehicles. Right: The effects of rebalancing on congestion. The x-axis is the ratio of rebalancing vehicles to passenger vehicles on the road. The y-axis is the fractional increase in road utilization due to rebalancing.

arrival at their destination, but the time spent waiting for the vehicle could be used for productive work as opposed to being stuck in traffic. Specifically, for highly congested systems, vehicle departures can be staggered to avoid excessive congestion, and the routing problem is similar to the simultaneous departure and routing problem [37].

Besides congestion, several additional directions are open for future research. As far as modeling is concerned, those include (i) analysis in a time-varying setup (e.g., with periodically time-varying arrival rates), (ii) inclusion of mesoscopic and microscopic effects into the models (e.g., increased throughput due to platooning or automated intersections), and (iii) more complex models for the transportation requests (e.g., time windows or priorities). On the control side, those include (i) inclusion of recharging constraints in the routing process, (ii) control of AMoD systems as part of a *multi-modal* transportation network, which should address synergies between AMoD and alternative transportation modes and interactions with human-driven vehicles, and (iii) deployment of control algorithms on real-world test beds.

19.4.2 Future research on AMoD evaluation

The AMoD evaluation presented in Section 19.3 already showed that AMoD systems might hold significant financial benefits. Remarkably, such financial benefits might be even larger when one also accounts for the positive externalities of an AMoD system, e.g., improved safety, freeing up urban land for other uses, and even creating a new economy based on infotainment systems onboard the self-driving vehicles. Such additional benefits, however, have not been thoroughly characterized yet and require additional analyses. Another research direction involves the evaluation of AMoD systems for more complex deployment options, e.g., as a last-mile solution within a multi-modal transportation system, or with a more sophisticated service structure, e.g., multiple priority classes.

19.5 Conclusions

This chapter overviewed recent results regarding the modeling, control, and evaluation of autonomous mobility-on-demand systems. Case studies of New York City and Singapore suggest that it would be much more affordable (and more convenient) to access mobility in an AMoD system compared to traditional mobility systems based on private vehicle ownership. More studies are however needed to devise efficient, system-wide coordination algorithms for complex AMoD systems as part of a multi-modal transportation network, and to fully assess the related economic benefits.

19.5.1 Acknowledgments

The author acknowledges the collaboration with Emilio Frazzoli (MIT), Rick Zhang (Stanford), Kyle Treleaven (MIT), Kevin Spieser (MIT) and Daniel Morton (SMART center) on the results presented in this chapter.

References

1. W. J. Mitchell, C. E. Borroni-Bird, and L. D. Burns. *Reinventing the Automobile: Personal Urban Mobility for the 21st Century*. The MIT Press, Cambridge, MA, 2010.
2. International Energy Outlook 2013. Technical report, U.S. Energy Information Administration, 2013.
3. The Emissions Gap Report 2013 – UNEP. Technical report, United Nations Environment Programme, 2013.
4. U.S. Environmental Protection Agency. Greenhouse Gas Equivalencies Calculator. Online: <http://www.epa.gov/cleanenergy/energy-resources/refs.html>, 2014.
5. Our Nation's Highways: 2011. Technical report, Federal Highway Administration, 2011.
6. D. Schrank, B. Eisele, and T. Lomax. TTI's 2012 urban mobility report. Technical report, Texas A&M Transportation Institute, Texas, USA, 2012.
7. UN. World urbanization prospects: The 2011 revision population database. Technical report, United Nations, 2011.
8. A. Santos, N. McGuckin, H. Y. Nakamoto, D. Gray, and S. Liss. Summary of travel trends: 2009 national household travel survey, 2011.
9. CAR2GO. CAR2GO Austin. Car Sharing 2.0: Great idea for a great city. online: <http://www.car2go.com/austin/en/>, 2011.
10. J. Motavalli. G.M. EN-V: Sharpening the focus of future urban mobility. Online: <http://wheels.blogs.nytimes.com/2010/03/24/g-m-en-v-sharpening-the-focus-of-future-urban-mobility>. The New York Times, 24 March 2010.
11. Induct. Navia – the 100% electric automated transport. Online: <http://navya-technology.com/>, 2013.
12. Google. Just press go: designing a self-driving vehicle. Online: <http://googleblog.blogspot.com/2014/05/just-press-go-designing-self-driving.html>, 2014.
13. R. Zhang and M. Pavone. Control of robotic mobility-on-demand systems: a queueing-theoretical perspective. In *Robotics: Science and Systems Conference*, 2014.
14. M. Pavone. *Dynamic vehicle routing for robotic networks*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2010.
15. K. Treleaven, M. Pavone, and E. Frazzoli. Models and asymptotically optimal algorithms for pickup and delivery problems on roadmaps. In *Proc. IEEE Conf. on Decision and Control*, pages 5691–5698, 2012.
16. K. Treleaven, M. Pavone, and E. Frazzoli. Asymptotically optimal algorithms for one-to-one pickup and delivery problems with applications to transportation systems. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 58(9):2261–2276, 2013.
17. E. Frazzoli and M. Pavone. Multi-vehicle routing. In *Springer Encyclopedia of Systems and Control*. Springer, 2014.
18. K. Spieser, K. Treleaven, R. Zhang, E. Frazzoli, D. Morton, and M. Pavone. Toward a systematic approach to the design and evaluation of automated mobility-on-demand systems: A case study in Singapore. In *Road Vehicle Automation*. Springer, 2014.

19. R. C. Larson and A. R. Odoni. *Urban operations research*. Prentice-Hall, 1981.
20. D. J. Bertsimas and G. J. van Ryzin. A stochastic and dynamic vehicle routing problem in the Euclidean plane. *Operations Research*, 39:601–615, 1991.
21. D. J. Bertsimas and D. Simchi-Levi. A new generation of vehicle routing research: robust algorithms, addressing uncertainty. *Operations Research*, 44(2):286–304, 1996.
22. D. J. Bertsimas and G. J. van Ryzin. Stochastic and dynamic vehicle routing in the Euclidean plane with multiple capacitated vehicles. *Operations Research*, 41(1):60–76, 1993.
23. D. J. Bertsimas and G. J. van Ryzin. Stochastic and dynamic vehicle routing with general inter-arrival and service time distributions. *Advances in Applied Probability*, 25:947–978, 1993.
24. T. L. Friesz, J. Luque, R. L. Tobin, and B. W. Wie. Dynamic network traffic assignment considered as a continuous time optimal control problem. *Operations Research*, 37(6):893–901, 1989.
25. S. Peeta and A. Ziliaskopoulos. Foundations of dynamic traffic assignment: The past, the present and the future. *Networks and Spatial Economics*, 1:233–265, 2001.
26. E. Feuerstein and L. Stougie. On-line single-server dial-a-ride problems. *Theoretical Computer Science*, 268(1):91–105, 2001.
27. P. Jaillet and M. R. Wagner. Online routing problems: Value of advanced information and improved competitive ratios. *Transportation Science*, 40(2):200–210, 2006.
28. G. Berbeglia, J. F. Cordeau, and G. Laporte. Dynamic pickup and delivery problems. *European Journal of Operational Research*, 202(1):8–15, 2010.
29. D. K. George and C. H. Xia. Fleet-sizing and service availability for a vehicle rental system via closed queueing networks. *European Journal of Operational Research*, 211(1):198–207, 2011.
30. J. R. Jackson. Networks of waiting lines. *Operations Research*, 5(4):518–521, 1957.
31. J. R. Jackson. Jobshop-like queueing systems. *Management science*, 10(1):131–142, 1963.
32. L. Ruschendorf. The Wasserstein distance and approximation theorems. *Probability Theory and Related Fields*, 70:117–129, 1985.
33. M. Pavone, K. Treleaven, and E. Frazzoli. Fundamental performance limits and efficient policies for transportation-on-demand systems. In *Proc. IEEE Conf. on Decision and Control*, pages 5622–5629, 2010.
34. Singapore Land Transport Authority. 2008 Household interview travel survey background information, 2008.
35. Land Transport Authority. Singapore land transit statistics in brief, 2012.
36. HEATCO. Harmonized European approaches for transport costing and project assessment. Online: <http://heatco.ier.uni-stuttgart.de>, 2006.
37. H. Huang and W. H. K. Lam. Modeling and solving the dynamic user equilibrium route and departure time choice problem in network with queues. *Transportation Research Part B: Methodological*, 36(3):253–273, 2002.

Hermann Winner, Markus Maurer

Autonomes Fahren muss sicher sein – die Legitimität dieser Forderung ist unbestritten. Doch was ist für diesen Wunschzustand alles zu beachten? Der Einstieg in diese Thematik erfolgt über die maschinelle Wahrnehmung, die schließlich als *enabling technology* für das autonome Fahren angesehen wird. Selbstverständlich ist, dass nur das, was zuverlässig erkannt wird, auch in eine sichere Fahrentscheidung umgesetzt werden kann. Lässt sich und, wenn ja, wie lässt sich sicherstellen, dass die maschinelle Wahrnehmung die für die Sicherheit erforderliche Qualität aufweist? Welche Möglichkeiten zur Qualifizierung der Wahrnehmungsleistung *onboard* bestehen, welche Grenzen lassen sich nicht überschreiten und wie sind diese für die Entwicklung des autonomen Fahrens zu bewerten? Diese Fragen sind Kernfragen im Kapitel *Prädiktion von maschineller Wahrnehmungsleistung beim automatisierten Fahren* von Klaus Dietmayer.

Ist es gelungen, die Anforderungen an ein autonomes Fahrzeug erfolgreich zu definieren und umzusetzen, so bleibt die Herausforderung zu verifizieren und zu validieren, ob die Anforderungen durch die vorliegende Realisierung wirklich erfüllt werden. Unter den Experten herrscht Einigkeit, dass sich autonome Fahrzeuge allein mit den heute eingesetzten Test- und Absicherungsmethoden nicht werden freigegeben lassen. Walther Wachenfeld und Hermann Winner erläutern die Herausforderungen und skizzieren Ansätze, die Bestandteile neuer Werkzeugketten für die Absicherung sein könnten, in ihrem Beitrag *Die Freigabe des autonomen Fahrens*.

Auch der Mensch ist zu Beginn seiner Karriere als Autofahrer weit entfernt von späterer Leistungsfähigkeit. Besondere Unfallhäufigkeiten bei jungen (männlichen) Fahrern zeugen davon. Mit wachsender Erfahrung verbessert sich die Sicherheit der Fahrerinnen und Fahrer deutlich, Menschen lernen sicher zu fahren. Walther Wachenfeld und Hermann Winner diskutieren unter dem Titel *Lernen autonome Fahrzeuge?* auf Basis intensiver Literaturstudien, inwieweit maschinelles Lernen den Anforderungen an die Sicherheit für autonomes Fahren genügen kann.

Ausgehend von der zentralen Norm ISO 26262 diskutiert Andreas Reschka, wann autonome Fahrzeuge im Allgemeinen und im Speziellen in den Use-Cases in einem sicheren

Zustand sind, wie Degradationen sicherer gestaltet werden könnten und welche Anforderungen an ein *Sicherheitskonzept für autonome Fahrzeuge* bestehen.

Kai Rannenberg zeigt in seinem Beitrag *Erhebung und Nutzbarmachung zusätzlicher Daten – Möglichkeiten und Risiken* auf, dass offene Schnittstellen und Kommunikation mit Teilnehmern außerhalb des Fahrzeugs zwar aus Sicht der Funktionalität, der Absicherung und des Funktionsnachweises hilfreich sein mögen, dass sie aber im Sinne des Datenschutzes und der Datenintegrität sehr bedenklich sein können. Er wird argumentieren, dass maschinelle Autonomie auch mit einem Verlust an Privatheit verbunden sein kann, aber vielleicht nicht notwendigerweise verbunden sein sollte.

Prädiktion von maschineller Wahrnehmungsleistung beim automatisierten Fahren

20

Klaus Dietmayer

Inhaltsverzeichnis

20.1 Einleitung	420
20.2 Maschinelle Wahrnehmung	422
20.2.1 Umfang und Ausprägung	422
20.2.2 Ausprägung von Umgebungsmodellen	424
20.3 Methoden zum Umgang mit Unsicherheiten der maschinellen Wahrnehmung	425
20.3.1 Unsicherheitsdomänen	425
20.3.2 Zustandsunsicherheit	426
20.3.3 Existenzunsicherheit	429
20.3.4 Klassenunsicherheit	431
20.3.5 Zusammenfassende Bewertung	432
20.4 Folgerungen für die maschinelle Wahrnehmungsleistungsprädiktion	433
20.5 Zusammenfassung	436
Literatur	437

K. Dietmayer (✉)
Universität Ulm, Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik, Deutschland
klaus.dietmayer@uni-ulm.de

20.1 Einleitung

Beim hoch- und vollautomatisierten Fahren ist es aufgrund der dem Fahrer zugewilligten Nebenaufgaben notwendig, dass das Fahrzeug Einschränkungen seiner maschinellen Wahrnehmung sowie Funktionseinschränkungen darauf aufbauender Verarbeitungsmodulen selbst erkennt und darauf adäquat reagiert. Während man aufgrund von Simulatorstudien beim hochautomatisierten Fahren von realistischen Übergabezeiten an den Fahrer von fünf bis zehn Sekunden ausgeht [1], [2], bevor dieser die Fahraufgabe wieder sicher übernehmen kann, wäre beim vollautomatisierten Fahren der Mensch überhaupt keine Rückfallebene mehr. Das Fahrzeug müsste bei Funktionseinschränkungen vollständig selbst einen eigensicheren Zustand erreichen können. Aber auch mögliche Übergabezeiten von fünf Sekunden und mehr erfordern eine weitgehende, wenn auch zeitbegrenzte Autonomie des Fahrzeugs, um diesen Zeitraum unter allen Umständen sicher überbrücken zu können.

Um diesen Grad der Autonomie erreichen zu können, muss das Fahrzeug seine Umgebung wahrnehmen, geeignet interpretieren und daraus kontinuierlich sichere Handlungen ableiten und ausführen. Technisch wird diese Aufgabe durch einzelne, aufeinander aufbauende Verarbeitungsmodulen gelöst. Eine vereinfachte Darstellung der Zusammenhänge zeigt Abb. 20.1.

Die maschinelle Wahrnehmung der Fahrumgebung erfolgt durch verschiedene am Fahrzeug verbaute Sensoren wie Kameras oder Radarsensoren. Hinzu kommen in der Regel weitere Informationen über das statische Fahrumfeld aus hochgenauen digitalen Karten. Sie sind allerdings nur dann nutzbar, wenn das Fahrzeug seine genaue Position kennt. Somit ist als weiteres Funktionsmodul auch eine Eigenlokalisierung des Fahrzeugs für den Kartenabgleich erforderlich. Das Ergebnis der maschinellen Wahrnehmung ist ein dynamisches Fahrzeugumfeldmodell, in dem das eigene Fahrzeug sowie alle anderen Verkehrsteilnehmer durch individuelle Bewegungsmodelle repräsentiert sind. Ferner sollten alle relevanten

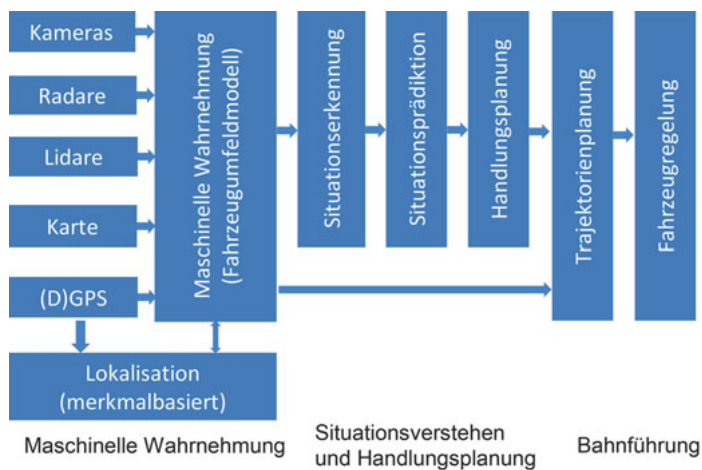


Abb. 20.1 Grobstruktur der Informationsverarbeitung bei der automatisierten Fahrzeugführung

Infrastruktureinrichtungen wie Verkehrsschilder und Lichtsignalanlagen, aber auch strukturierende Elemente wie Verkehrsinseln und Bordsteine sowie Fahrbahnmarkierungen für die Fahrstreifeneinteilung, gesperrte Flächen oder Fußgängerüberwege in Form von Zebrastrifen enthalten sein.

Aufbauend auf diesem Fahrzeugumfeldmodell werden dann bei der Situationserkennung alle Einzelkomponenten in Beziehung zueinander gesetzt, um aus den Abhängigkeiten der Einzelelemente ein maschinelles Szenenverständnis zu errechnen. Im darauf aufbauenden Modul der Situationsprädiktion werden verschiedene mögliche zeitliche Entwicklungen der Szene, auch Episoden genannt, vorausberechnet und hinsichtlich der Wahrscheinlichkeit des Eintretens bewertet. Eine Episode kennzeichnet damit in diesem Beitrag eine mögliche spezifische zeitliche Entwicklung einer erkannten Verkehrsszene, wobei der Zeithorizont im Bereich von wenigen Sekunden liegt. Auf Basis dieser situativen Informationen ermittelt das darauf aufbauende Modul eine übergeordnete Handlungsplanung. Sie könnte beispielsweise das Umfahren eines Hindernisses oder das Überholen eines langsameren Fahrzeugs vorsehen. Zur Ausführung der Pläne werden dann mögliche Trajektorien des Fahrzeugs mit einem typischen Zeithorizont von drei bis fünf Sekunden berechnet und hinsichtlich Sicherheit und Komfort bewertet. Die nach vorgebbaren Kriterien optimale Trajektorie wird von der Fahrzeugregelung ausgeführt. Der beschriebene Bearbeitungsprozess wird fortlaufend, in der Regel schritthaltend mit der sensorischen Erfassung erneut durchgeführt, um auf Aktionen und Reaktionen anderer Verkehrsteilnehmer reagieren zu können.

Die Beschreibung dieser technischen Prozesskette macht deutlich, dass ein Ausfall der maschinellen Wahrnehmung umgehend zu so großen Unsicherheiten in der Situationsbewertung führen würde, dass eine sichere Handlungsplanung und Handlungsausführung nicht mehr gewährleistet werden kann. Die Degradation des maschinellen Szenenverständnisses und der darauf aufbauenden Handlungsplanung und Handlungsausführung ist situationsabhängig; eine zuverlässige Prädiktion wird typisch aber zwei bis drei Sekunden nicht übersteigen können. Es ist somit evident, dass eine Mindestwahrnehmungsleistung schon beim hochautomatisierten Fahren aufgrund der deutlich größeren Übergabezeiträume an den Fahrer notwendig ist. Ein Komplettausfall der maschinellen Wahrnehmung ist unter allen Umständen zu vermeiden, wobei dies natürlich auch für die darauf aufbauenden Module und die Fahrzeugregelung mit ihren Sensoren und Aktoren gilt, die aber nicht im Fokus dieses Beitrags stehen.

Es stellt sich daher die Frage, ob Einschränkungen in der Funktion der maschinellen Wahrnehmung erkennbar oder sogar präzifizierbar sind und, falls ja, über welchen Zeitraum. In den folgenden Abschnitten werden hierzu nach dem Stand der Technik bekannte methodische Ansätze diskutiert und darauf aufbauend mögliche Forschungsfragen abgeleitet.

20.2 Maschinelle Wahrnehmung

20.2.1 Umfang und Ausprägung

Die maschinelle Wahrnehmung hat, wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, die Aufgabe, alle für die Funktion des automatisierten Fahrens relevanten anderen Verkehrsteilnehmer sicher zu erkennen und der Verkehrsinfrastruktur korrekt zuzuordnen. Dies ist insbesondere deshalb notwendig, da beispielsweise für einen Fußgänger am Straßenrand ein anderes Gefährdungspotenzial besteht, als wenn er einen parallel verlaufenden, abgetrennten Fußgängerweg benutzt.

Zur maschinellen Wahrnehmung werden im Fahrzeugumfeld Sensoren verwendet, die auf Kamera- sowie Radar- und/oder Lidartechnik basieren. Nähere Informationen zu der Funktion und den Bauformen dieser Sensoren sind beispielsweise in [3] zu finden. Kameras liefern ein 2-D-Abbild der 3-D-Szene in Form von hoch aufgelösten Grauwert- oder Farbbildern, aus denen bei genügendem Kontrast oder Unterschieden in der Textur einzelne Objekte mit Methoden der Bildverarbeitung extrahiert werden können. Eine Bestimmung der Objektentfernung ist mit Mono-Kameras allerdings nur mit oft zu Fehlern führenden Annahmen wie einer ebenen Fahrbahn möglich. Stereo-Kameras erlauben zwar über das Disparitätsbild auch eine Bestimmung der Objektentfernung, die Genauigkeit sinkt jedoch quadratisch mit zunehmender Entfernung. Bei den heute üblichen Basisabständen der Stereoanordnungen und Auflösung der Kameras sind Messreichweiten bis etwa 50 Meter möglich, ohne dass der Fehler so stark ansteigt, dass Funktionen hieraus keinen Nutzen mehr ziehen könnten.

Radar-, aber auch Lidarsensoren liefern hingegen vergleichsweise sehr genaue und auch hinsichtlich der Messfehler nahezu distanzunabhängige Entfernungsmessdaten. Sie können aber aufgrund der geringeren Winkelauflösung die Konturen, d. h. die Außenabmessungen von Objekten, schlechter erfassen. Dies gilt insbesondere für Radarsensoren. Zudem liefern Radar- und Lidarsensoren keinerlei Texturinformationen. Aufgrund dieser unterschiedlichen Messeigenschaften werden die unterschiedlichen Sensortypen für die Aufgabe der maschinellen Wahrnehmung in der Regel kombiniert verwendet. Man spricht dann von einer Sensordatenfusion.

Mit den fusionierten Sensordaten lassen sich bewegte und statische Objekte, aber beispielsweise auch Fahrbahnmarkierungen grundsätzlich erkennen und physikalisch vermessen. Die möglichen Messdimensionen hängen vom spezifischen Sensor-Setup ab. Typische erfassbare physikalische Messdaten sind die Abmessungen eines Objekts als Quadermodell mit Länge, Breite und Höhe sowie seine Position absolut in der Welt oder relativ zum eigenen Fahrzeug. Im Fall von bewegten Objekten kommen dann noch die Objektgeschwindigkeiten und Objektbeschleunigungen als relativ einfach bestimmbare Zustandsgrößen hinzu. Schwerer und in der Regel sehr unsicher bestimmbar aus externen Sensormessungen ist die Gierrate beziehungsweise die Kursrate anderer Verkehrsteilnehmer. Diese Größen sind ohne Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation nur für das eigene Fahrzeug zuverlässig ermittelbar.

Für die spätere Situationsbewertung und Situationsprädiktion ist allerdings nicht nur die physikalische Vermessung der Objekte notwendig, sondern auch die Kenntnis darüber, um welche Objektklasse es sich handelt. Beispielsweise unterscheiden sich ein Fußgänger und ein Motorradfahrer in ihren möglichen Bewegungsfreiheitsgraden und auch in der möglichen Bewegungsdynamik. Markierungsstreifen auf der Fahrbahn können je nach Kontext und Konstellation unterschiedliche Bedeutungen haben. Daher ist es notwendig, auch die semantische Bedeutung der erkannten Objekte aus den Sensordaten oder weiteren Informationsquellen wie einer digitalen Karte zu ermitteln. Dieser Vorgang wird im Zusammenhang mit der maschinellen Wahrnehmung als Klassifikationsschritt bezeichnet, ist aber Bestandteil der maschinellen Wahrnehmung.

Während Menschen sehr schnell und fehlerfrei den visuellen Wahrnehmungen auch semantische Bedeutung zuordnen können, ist dies für die maschinelle Wahrnehmung nach dem heutigen Stand der Technik noch eine vergleichsweise schwierige Aufgabe. Bekannte Klassifikationsverfahren basieren immer auf mehr oder weniger komplexen Modellen erwarteter Objektklassen, die entweder aus Beispielen automatisiert gelernt oder manuell vorgegeben werden. Diese Modelle weisen dann möglichst diskriminierende, mit den verfügbaren Sensoren erfassbare Merkmale auf, sodass zwischen den vorkommenden Objektklassen unterschieden werden kann. Es wird aber auch deutlich, dass vorab nicht trainierte Objektklassen mit heute bekannten Verfahren auch nicht semantisch identifiziert werden können. Aufgrund der signifikant höheren Leistungsfähigkeit haben sich lernende Klassifikationsverfahren heute weitgehend durchgesetzt.

Eine maschinelle Wahrnehmung mit semantischen Informationen ist im Kontext der Fahrerassistenzsysteme und des automatisierten Fahrens nur deshalb technisch möglich, weil der Verkehrsraum gut strukturiert und auf wenige Objektklassen beschränkt ist. Zudem ist für die Situationserkennung und Situationsprädiktion nur eine grobe Klassenunterscheidung relevant. Nach dem heutigen Stand der Technik reicht es aus, unter den bewegten Objekten zwischen den Klassen Fußgänger, Radfahrer, Personenkraftwagen und Lastkraftwagen bzw. Bussen unterscheiden zu können. Hinzu kommen noch stationäre Hindernisse, die jedoch meist zusammen mit den nicht klassifizierbaren Objekten einer Restklasse hinzugefügt werden.

Für die korrekte Zuordnung der klassifizierten Objekte zur Verkehrsinfrastruktur ist es ferner notwendig, auch Fahrstreifenmarkierungen, Sperrflächen, Haltelinien, Lichtsignalanlagen und Verkehrsschilder zuverlässig mit korrekter semantischer Bedeutung zu erkennen. Da diese komplexe Klassifikationsaufgabe heute noch nicht mit der notwendigen Zuverlässigkeit möglich ist, werden nach dem Stand der Technik unterstützend hochgenaue und umfassend attributierte digitale Karten verwendet. Hieraus kann das automatisierte Fahrzeug bei bekannter eigener Position die im Sensorsichtfeld zu erwartenden stationären Objekte sowie Markierungen inklusive semantischer Bedeutung entnehmen. Die Sensorik muss dann nur noch das Vorhandensein der Objekte verifizieren.

Ein Nachteil dieser Vorgehensweise ist es, dass zum einen eine hochgenaue Lokalisation des eigenen Fahrzeugs notwendig ist, für die Standard-GPS-Verfahren nicht ausreichen, und zum anderen die Karte immer aktuell sein muss. Aus diesem Grund wird man zukünf-

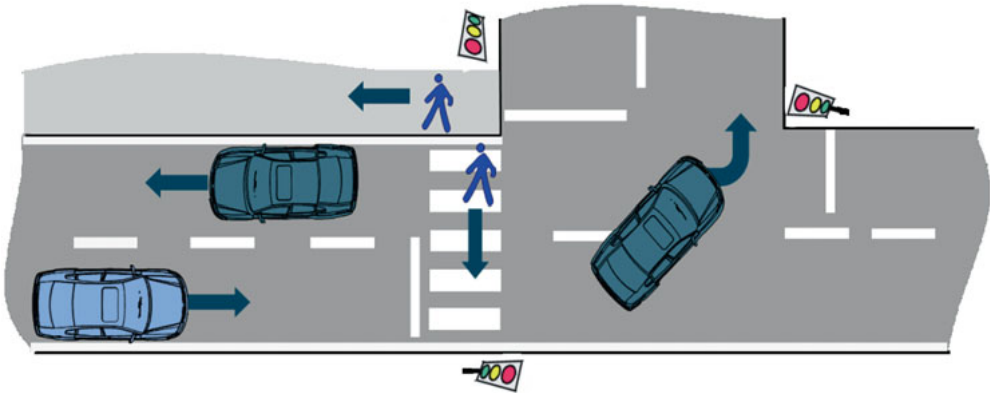


Abb. 20.2 Prinzipbild der objektbasierten Fahrumgebungsrepräsentation. Es werden alle relevanten Objekte erkannt, klassifiziert und der Infrastruktur korrekt zugeordnet

tig versuchen technische Lösungen zu entwickeln, die keine hochgenaue und aktuelle Karte mehr benötigen.

20.2.2 Ausprägung von Umgebungsmodellen

Die maschinelle Wahrnehmung mündet in ein Fahrumgebungsmodell, wobei man objektbasierte und gitterbasierte Repräsentationsformen unterscheidet. Beide Repräsentationsformen sind grundsätzlich kombinierbar.

Unter einem objektbasierten Fahrzeugumfeldmodell versteht man eine dynamische Datenstruktur, in der alle relevanten Objekte und Infrastrukturelemente in der Nähe des eigenen Fahrzeugs korrekt in Ort und Zeit in einem gemeinsamen Bezugssystem enthalten sind. Die Erfassung und zeitliche Verfolgung der Objekte und Infrastrukturelemente erfolgen wie oben erläutert fortlaufend durch geeignete, in der Regel fusionierte bordeigene Sensoren wie Kameras und Radare sowie die zusätzliche Nutzung hochgenauer digitaler Karten. Abb. 20.2 zeigt beispielhaft Komponenten, die eine Fahrumgebungsrepräsentation enthalten kann.

Welche Objekte und Strukturelemente für das automatisierte Fahren relevant sind, hängt maßgeblich von der zu bewältigenden Fahraufgabe ab, deren Komplexität beginnend mit einfachen Autobahnscenarien, über Landstraßen bis hin zum innerstädtischen Verkehr stark zunimmt. Bei der objektbasierten Repräsentation werden alle für die Repräsentation relevanten anderen Verkehrsteilnehmer, die relevanten Infrastrukturelemente sowie das eigene Fahrzeug selbst jeweils durch ein eigenes dynamisches Objektmodell, in der Regel ein zeitdiskretes Zustandsraummodell, beschrieben. Dessen Zustände wie Position, Geschwindigkeit oder auch 2-D/3-D-Objektausdehnung werden schritthaltend mit den Sensormessungen fortlaufend aktualisiert. Ferner erfolgt eine fortlaufende Erfassung der Fahrbahnmarkierungen sowie der Verkehrszeichen und des Status der Lichtsignalanlagen.

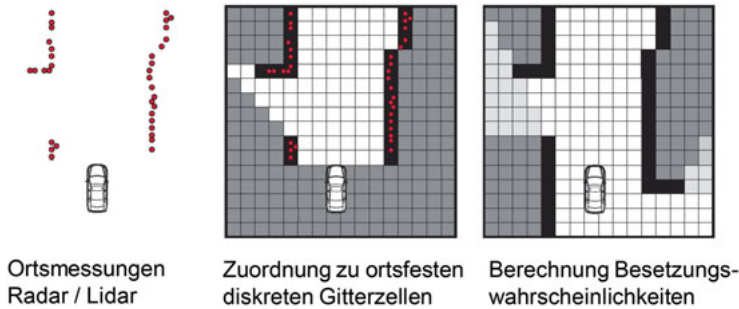


Abb. 20.3 Prinzipbild des Aufbaus einer rasterbasierten Fahrumgebungsrepräsentation. Hier sind im einfachsten Fall nur statische Hindernisse enthalten.

Eine gitterbasierte Darstellung verwendet Rasterkarten, um die Umwelt ortsfest in gleich große Zellen einzuteilen. Das Fahrzeug bewegt sich über dieses ortsfeste 2-D- oder 3-D-Gitter, und die bordautarke Sensorik liefert dann nur Informationen, ob spezifische Zellen frei sind und damit frei befahren werden können oder ob sich in der jeweiligen Zelle ein Hindernis befindet. Zudem kann auch der Zustand modelliert werden, dass über Zellen keine Informationen vorliegen. Diese Art der Darstellung eignet sich vornehmlich zur Repräsentation statischer Szenarien und statischer Hindernisse. Sie benötigt keinerlei Modellhypothesen über die zu erwartenden Objektklassen und ist daher als sehr robust gegen Modellfehler einzustufen. Abb. 20.3 zeigt die grundsätzliche Vorgehensweise. Mehr Informationen zu gitterbasierten Repräsentationen ist [4], [5], [6], [7] und [8] zu entnehmen.

20.3 Methoden zum Umgang mit Unsicherheiten der maschinellen Wahrnehmung

20.3.1 Unsicherheitsdomänen

Wie in Abschn. 20.2 beschrieben, umfasst die maschinelle Wahrnehmung unterschiedliche Aufgabenumfänge. Diese sind zum einen die Detektion von statischen und dynamischen Objekten und ihre möglichst genaue physikalische Vermessung, zum anderen aber auch die Zuordnung der korrekten semantischen Bedeutung der detektierten Objekte. Entsprechend diesen Aufgaben existieren für die maschinelle Wahrnehmung die folgenden drei Unsicherheitsdomänen:

1. Zustandsunsicherheit

Die Zustandsunsicherheit beschreibt die Unsicherheit in den physikalischen Messgrößen wie Größe, Position und Geschwindigkeit und ist eine direkte Folge der bei Sensoren prinzipiell nicht vermeidbaren Messfehler.

2. Existenzunsicherheit

Die Existenzunsicherheit beschreibt die Unsicherheit darüber, ob ein von der Sensorik erkanntes und in die Umgebungsrepräsentation übernommenes Objekt überhaupt real existiert. Fehler dieser Art können durch Unzulänglichkeiten in den Signalverarbeitungsalgorithmen oder durch Fehlmessungen der Sensoren selbst entstehen.

3. Klassenunsicherheit

Hiermit ist die Unsicherheit hinsichtlich der korrekten semantischen Zuordnung gemeint, die durch Unzulänglichkeiten der Klassifikationsverfahren bzw. nicht ausreichend gute Messdaten verursacht werden können.

Für die Anwendung des automatisierten Fahrens ist es notwendig, die Unsicherheiten bzw. Fehler in den verschiedenen Domänen zuverlässig zu erkennen und, falls möglich, sogar präzisieren zu können. Methodisch werden zur Behandlung von Unsicherheiten nach dem Stand der Technik fast ausnahmslos Verfahren basierend auf der Bayes-Theorie [10], [11], [12] oder ihrer Verallgemeinerung, der Dempster-Shafer-Theorie [16], verwendet. Sie besitzen den Vorteil, dass sie eine durchgehend probabilistische und daher weitgehend heuristikfreie Behandlung der Unsicherheitsdomänen erlauben.

Die o. g. Unsicherheitsdomänen beziehen sich im engeren Sinne zunächst nur auf die bordeigene Sensorik. Es lassen sich allerdings auch Fehler in Informationen aus einer digitalen Karte oder den durch Car2x-Kommunikation gewonnenen Daten entsprechend kategorisieren. Gerade die zuletzt genannte Car2x-Kommunikation birgt zwar durch mögliche variable Latenzzeiten bei der Übertragung und eventuell nicht genau bekannte Unsicherheitsbewertungen der Sendequellen zusätzliche Fehlereinflüsse. Die Auswirkungen lassen sich jedoch wieder den drei genannten Unsicherheitsdomänen zuordnen, sodass hierauf nicht weiter eingegangen wird.

20.3.2 Zustandsunsicherheit

Die Zustandsunsicherheit eines detektierten Objektes wird gemäß der Bayes-Theorie durch eine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion beschrieben, anhand derer der wahrscheinlichste Gesamt- bzw. Einzelzustand sowie mit gewisser Wahrscheinlichkeit auch mögliche Variationen hiervon bestimmt werden können. Im Fall einer mehrdimensionalen, normalverteilten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion ist die Zustandsunsicherheit durch eine Kovarianzmatrix vollständig repräsentiert.

Bei der Schätzung statischer Größen wie beispielsweise die Fahrzeugabmessungen kann deren Zustandsunsicherheit durch wiederholte Messungen immer weiter verringert werden. Der Schätzwert auf Basis der verfügbaren Messungen konvergiert gegen den wahren Wert, falls kein systematischer Sensorfehler, beispielsweise in Form eines Offsets, vorliegt. Bei der Schätzung von dynamischen, zeitveränderlichen Zuständen wie der Objektposition oder Objektgeschwindigkeit ist aufgrund der Bewegung des Objektes zwischen den Messzeitpunkten die Konvergenz gegen einen wahren Wert nicht mehr gegeben. Bei der Bewer-

tung der Güte der Zustandsschätzung wird daher gefordert, dass der Fehler im Mittel null ist und die Unsicherheit möglichst gering.

Das grundlegende Verfahren zur Behandlung von Zustandsunsicherheiten ist das allgemeine Bayes-Filter [10]. Bei ihm werden der geschätzte Zustand eines Objektes und die dazugehörige Unsicherheit durch eine mehrdimensionale Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion p (engl. probability density function, PDF) repräsentiert:

$$p_{k+1}(x_{k+1} | Z_{1:k+1}).$$

Sie hängt allgemein von allen bis zum Zeitpunkt $k + 1$ vorhandenen Messungen $Z_{1:k+1} = \{z_1, \dots, z_{k+1}\}$ ab. Dies wird durch die gewählte Schreibweise einer bedingten Wahrscheinlichkeit ausgedrückt, d. h., die Wahrscheinlichkeit für den Zustand des Systems x ist bedingt durch die Messungen Z .

Das Bewegungsmodell eines durch die Sensoren erfassten Objektes für den Zeitraum zwischen zwei aufeinanderfolgenden Messungen ist durch eine Bewegungsgleichung der Form

$$x_{k+1|k} = f(x_k) + v_k$$

zu beschreiben, wobei v_k eine additive Störgröße darstellt, die mögliche Modellfehler repräsentiert. Die Bewegungsgleichung drückt aus, in welchem Zustand wie Ort, Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung sich das Objekt zum nächsten Zeitpunkt wahrscheinlich befindet. Alternativ kann diese Bewegungsgleichung auch durch eine Markov-Übergangswahrscheinlichkeitsdichte ausgedrückt werden:

$$f_{k+1|k}(x_{k+1} | x_k).$$

Die Markov-Übergangswahrscheinlichkeitsdichte ist letztendlich nur eine andere mathematische Schreibweise für dieselben Modellannahmen. Um die Gleichungen praktisch berechenbar zu halten, ist es üblich, eine Markov-Eigenschaft erster Ordnung vorzusetzen. Diese Eigenschaft sagt vereinfachend aus, dass der zukünftige Zustand eines Systems nur vom zuletzt bekannten Zustand und der aktuellen Messung abhängt, nicht aber von der gesamten Historie von Messungen und Zuständen. Die Markov-Eigenschaft erster Ordnung ist damit eine vorausgesetzte Systemeigenschaft.

Im konkreten Fall hängt der prädizierte Zustand x_{k+1} des Objektes vor dem Vorliegen der neuen Messung dann nur noch vom zuletzt ermittelten Zustand x_k ab, da dieser implizit die gesamte Messhistorie $Z_{1:k} = \{z_1, \dots, z_k\}$ enthält.

Die Vorhersage des aktuellen Objektzustandes x_k bis zum nächsten Messzeitpunkt $k + 1$ erfolgt schließlich unter Berücksichtigung der Modellannahmen anhand der Chapman-Kolmogorov-Gleichung

$$p_{k+1|k}(x_{k+1} | x_k) = \int f_{k+1|k}(x_{k+1} | x_k) p_k(x_k) dx_k.$$

Dies wird als Prädiktionsschritt des Bayes-Filters bezeichnet.

Der Messprozess der Sensoren lässt sich allgemein durch eine Messgleichung der Form

$$z_{k+1|k} = h_{k+1}(x_{k+1}) + w_{k+1},$$

beschreiben. Die Messfunktion $h(\cdot)$ beschreibt, wie Messungen und Zustandsgrößen zusammenhängen. Kann beispielsweise eine Zustandsgröße direkt gemessen werden, handelt es sich bei $h(\cdot)$ um eine Eins-zu-eins-Abbildung. Die stochastische Störgröße w_{k+1} repräsentiert hierbei einen möglichen Messfehler. Eine alternative mathematische Repräsentation der Messgleichung ist die Likelihood-Funktion

$$g(z_{k+1}|x_{k+1}).$$

Bei Vorliegen der aktuellen Messungen z_{k+1} wird die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des Objektzustandes aktualisiert. Die Berechnung der aktuellen Schätzung des Zustands erfolgt anhand der Bayes-Formel

$$p_{k+1}(x_{k+1}|z_{k+1}) = \frac{g(z_{k+1}|x_{k+1})p_{k+1|k}(x_{k+1}|x_k)}{\int g(z_{k+1}|x_{k+1})p_{k+1|k}(x_{k+1}|x_k)dx}.$$

Dieser zweite Schritt zum Einbringen der aktuellen Messung wird als Innovationsschritt bezeichnet.

Das durch Prädiktionsschritt und Innovationsschritt kurz beschriebene rekursive Schätzverfahren wird als allgemeines Bayes-Filter bezeichnet, worauf alle heute üblichen Methoden und Implementationen der stochastischen Zustandsschätzung basieren. Neben den Prozess- und Messgleichungen benötigt das Verfahren nur eine Apriori-PDF für den Objektzustand $p_0(x_0)$ zum Zeitpunkt $k = 0$. Das Filter ist in dieser allgemeinen Form jedoch nicht effizient zu implementieren.

Unter der Annahme von normalverteilten Messsignalen sowie linearen Modellen ermöglicht das Kalman-Filter [9] eine einfache analytische Implementation des allgemeinen Bayes-Filters. Da eine Gauß-Verteilung durch ihre ersten beiden statistischen Momente, d. h. den Mittelwert sowie die zugehörige Kovarianzmatrix, vollständig beschrieben ist, stellt die zeitliche Filterung der Momente eine mathematisch exakte Lösung dar. Eine Anwendung des Kalman-Filters auf Systeme mit nichtlinearen Prozess- oder Messgleichungen lässt sich anhand des Extended-Kalman-Filters (EKF) [12] sowie des Unscented-Kalman-Filters (UKF) [15] realisieren. Während das EKF die Systemgleichungen unter Nutzung einer Taylorreihen-Approximation linearisiert, ist das Ziel des UKF eine stochastische Approximation anhand sogenannter Sigma-Punkte [15].

Unabhängig von der konkreten Implementation ist allen auf dem allgemeinen Bayes-Filter basierenden Verfahren gemein, dass sie fortlaufend ein probabilistisches Maß für die Unsicherheit der aus den Sensordaten bestimmten physikalischen Größen liefern. Hierdurch lassen sich Ausfälle von Sensoren, aber auch eine Degeneration der Leistungsfähigkeit einzelner Sensoren zuverlässig erkennen. Weichen beispielsweise Messdaten einzelner

Sensoren signifikant, d. h. außerhalb der statistisch zu erwartenden Schwankungsbreite, ab, liegt eine entsprechende Leistungsminderung vor.

Es bleibt jedoch festzuhalten, dass eine Einschränkung der Sensorfunktion nur erkannt werden kann, nachdem sie aufgetreten ist. Außer Trendaussagen bei langsamer Degeneration ist keinerlei Vorhersage der zukünftigen Wahrnehmungsleistung bezogen auf die Zustandsunsicherheit möglich.

20.3.3 Existenzunsicherheit

Für die Realisierung des automatisierten Fahrens ist die Existenzunsicherheit mindestens genauso relevant wie die Zustandsunsicherheit. Sie drückt aus, mit welcher Wahrscheinlichkeit das Objekt in der Fahrumgebungsrepräsentation auch wirklich einem realen Objekt entspricht. Eine Notbremsung eines automatisierten Fahrzeugs sollte beispielsweise nur im Falle einer sehr hohen Existenzwahrscheinlichkeit eines erkannten Hindernisses ausgelöst werden.

Während die Schätzung von Zustandsunsicherheiten nach dem Stand der Technik durch Methoden der Bayes-Schätzung theoretisch fundiert erfolgt, wird die Existenzwahrscheinlichkeit in heutigen Systemen noch meist aufgrund eines heuristischen Qualitätsmaßes bestimmt. Ein Objekt gilt als bestätigt, wenn das Qualitätsmaß einen sensor- und anwendungsabhängigen Schwellwert überschreitet. Die Qualitätsmaße basieren beispielsweise auf der Anzahl der Messungen, die das Objekt bestätigt haben, oder einfach auf der Zeitspanne zwischen Initialisierung des Objektes und dem aktuellen Zeitpunkt. Häufig wird auch die Zustandsunsicherheit des Objektes (s. Abschn. 20.3.2) zur Validierung verwendet.

Ein theoretisch besser fundierter Ansatz ist die Schätzung einer wahrscheinlichkeitsbasierten Existenzwahrscheinlichkeit. Hierfür ist zunächst eine Definition der spezifischen Objektexistenz notwendig. Während in manchen Anwendungen sämtliche realen Objekte als existent betrachtet werden, kann die Objektexistenz auch auf die in der aktuellen Anwendung relevanten Objekte eingeschränkt werden. Des Weiteren ist eine Einschränkung auf die mit dem aktuellen Sensor-Setup auch detektierbaren Objekte möglich. Im Gegensatz zu einem Schwellwertverfahren ermöglicht diese Bestimmung der Existenzwahrscheinlichkeit jedoch eine wahrscheinlichkeitsbasierte Interpretationsmöglichkeit. Beispielsweise bedeutet eine Existenzwahrscheinlichkeit von 90 Prozent, dass die Messhistorie sowie das Bewegungsmuster des Objektes mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 Prozent von einem realen Objekt erzeugt wurden. Folglich kann die Handlungsplanung des automatisierten Fahrzeugs diese Wahrscheinlichkeiten bei der Bewertung von Handlungsalternativen verwenden.

Ein bekannter Algorithmus zur Berechnung einer Existenzwahrscheinlichkeit stellt das ebenfalls auf dem allgemeinen Bayes-Filter aufbauende Joint-Integrated-Probabilistic-Data-Association- (JIPDA-) Verfahren dar, das erstmals 2004 von Musicki [13] vorgestellt wurde. Es verwendet hierfür zusätzlich die als bekannt vorausgesetzten Detektions- und Falschalarmwahrscheinlichkeiten der Sensoren.

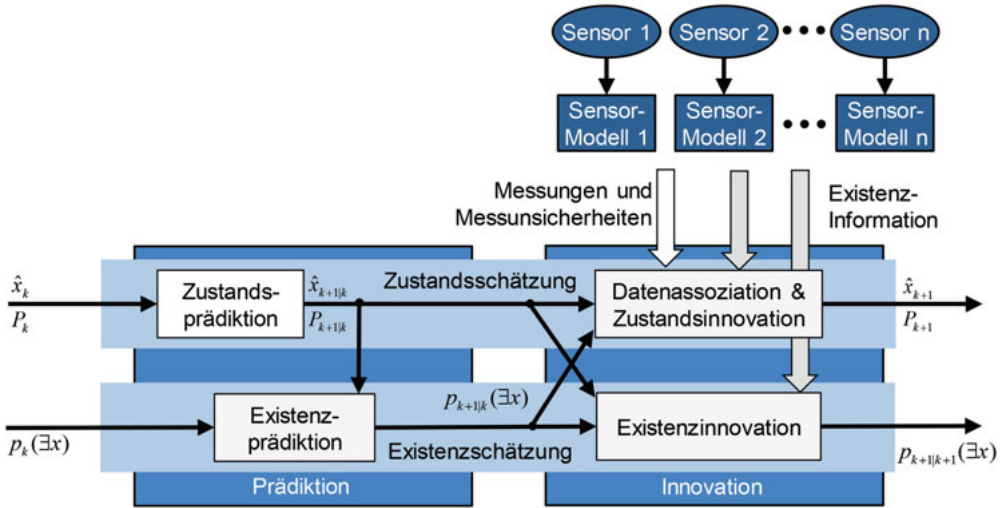


Abb. 20.4 Struktur eines JIPDA-Filters als Verkopplung zweier Markov-Ketten

Die Berechnung der aktuellen Objektexistenzwahrscheinlichkeit erfolgt analog zur Aktualisierung des Zustands im Kalman-Filter in einem Prädiktions- und einem Innovationschritt. Die Existenzprädiktion erfolgt anhand eines Markov-Modells erster Ordnung. Die prädizierte Existenz eines Objektes ist durch die Markov-Kette

$$p_{k+1|k}(\exists x) = p_S p_k(\exists x) + p_B p_k(\nexists x)$$

gegeben, wobei die Wahrscheinlichkeit p_S die Persistenzwahrscheinlichkeit des Objektes darstellt und p_B die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines Objektes in den Sensorerfassungsbereich. Folglich ist die Wahrscheinlichkeit für das Verschwinden eines Objektes gegeben durch $1 - p_S$. Im Innovationsschritt wird die Aposteriori-Existenzwahrscheinlichkeit $p_{k+1}(\exists x)$ berechnet. Sie hängt im Wesentlichen davon ab, wie viele aktuelle Messungen die Existenz des Objektes bestätigen.

Da die Persistenzwahrscheinlichkeit eines Objektes vom aktuellen Objektzustand abhängt und die Aposteriori-Existenzwahrscheinlichkeit wiederum von den Datenassoziationen, kann das JIPDA-Filter als die in Abb. 20.4 dargestellte Verkopplung zweier Markov-Ketten interpretiert werden. Die obere Markov-Kette stellt die aus dem Kalman-Filter bekannte Zustandsprädiktion und Innovation dar, während die untere Markov-Kette die Prädiktion und Innovation der Existenzwahrscheinlichkeit repräsentiert. Für Details zum JIPDA-Verfahren und seine spezifische Formulierung hinsichtlich der Anwendungen im Automotive-Bereich sei beispielsweise auf [14] verwiesen. Aktuelle und erst in den letzten Jahren entwickelte Multi-Objekttracking-Verfahren erlauben ebenfalls eine integrierte objektspezifische Existenzschätzung. Für weitere Informationen hierzu sei auf [10], [17], [18] und [19] verwiesen.

Hinsichtlich des funktionalen Verhaltens der Existenzschätzung gelten dieselben Einschränkungen wie bei der Zustandsschätzung. Es wird fortlaufend ein probabilistisches Maß für die spezifische Existenz des Objekts geliefert. Sensorausfälle während des Betriebs können daher auch in dieser Unsicherheitsdomäne zuverlässig erkannt werden. Eine Vorausschau auf eine künftige Leistungsfähigkeit ist allerdings hier ebenfalls nicht möglich.

20.3.4 Klassenunsicherheit

Klassifikationsverfahren zur Bestimmung der Objektklasse, also das Bestimmen semantischer Informationen, sind sehr sensorspezifisch aufgebaut. Aufgrund des signifikant höheren Informationsgehaltes überwiegen im Bereich der Klassifikation bildbasierte Verfahren. Grundsätzlich unterscheidet man lernende Verfahren, bei denen der Klassifikator aufgrund von Positiv- und Negativbeispielen offline trainiert wird und der dann im Onlinebetrieb die trainierten Objektklassen mehr oder weniger gut erkennen kann. Die im Training verwendeten Merkmale werden entweder vorgegeben oder auch selbst im Lernprozess implizit generiert. Methodisch haben sich bei den lernenden Verfahren zwei grundsätzliche Vorgehensweisen etabliert. Zum einen sind dies kaskadierte Verfahren nach Viola und Jones [20] oder Methoden basierend auf verschiedenen Neuronalen Netzen [21], [22].

Eine eher klassische, aber ebenfalls noch übliche Vorgehensweise ist es, aus Sensordaten möglichst zahlreiche, für die unterschiedlichen Klassen diskriminierende deterministische Merkmale wie Länge, Breite oder Geschwindigkeit festzulegen und hierfür die klassenspezifischen statistischen Schwankungsbereiche zu ermitteln. Der Mittelwert der Einzelmerkmale wird inklusive Schwankungsbreite beispielsweise durch eine Normalverteilung approximiert. Anschließend erfolgt auf Basis der aktuellen Messwerte und der bekannten Merkmalverteilungen die Bestimmung der nach im Bayes'schen Sinne wahrscheinlichsten Klasse. Sollen unterschiedliche Sensoren kombiniert verwendet werden, die jeweils nur einzelne Merkmale des Gesamtsets erfassen können, bietet sich die Dempster-Shafer-Theorie [16] zur Klassenbestimmung an, da sie es erlaubt, auch „Nichtwissen“ zu berücksichtigen. Diese Verfahren sind in der Regel allerdings weniger leistungsfähig als lernende Verfahren, sodass sie vermutlich weiter an Bedeutung verlieren werden.

Nachteilig bei allen genannten Klassifikationsverfahren ist, dass keine theoretisch fundierten Wahrscheinlichkeiten für die augenblickliche Güte der Klassifikation bestimmt werden können. Hierzu existiert zurzeit keine umfassende theoretische Basis. Als Ausgabe der Klassifikatoren dient zurzeit lediglich ein individuelles Zuverlässigkeitsmaß, das auf den Wertebereich von null bis eins normiert werden kann. Eine Wahrscheinlichkeit im engeren Sinne stellt es nicht dar, sodass unterschiedliche Algorithmen diesbezüglich auch nicht vergleichbar sind. Bildbasierte trainierte Klassifikatoren unterscheiden sich so sehr von merkmalsbasierten Verfahren aus Lidar- oder Radarsensoren, dass deren einheitliche Behandlung nicht einfach möglich sein wird.

Tab. 20.1 Unsicherheitsdomänen der maschinellen Wahrnehmung und deren methodische Behandlung

	Zustandsunsicherheit	Existenzunsicherheit	Klassenunsicherheit
Ausprägung	Unsicherheit in den Zustandsgrößen wie Objektposition, Objektgeschwindigkeit etc.	Unsicherheit, ob ein von Sensorik erfasstes Objekt real existiert	Unsicherheit über Klassenzugehörigkeit (z. B. Pkw <-> Lkw)
Ursache	stochastische Messfehler der verwendeten Sensorik	Detektionsunsicherheiten einzelner Sensoren, beispielsweise Kamera oder Radar	Klassifikationsunsicherheiten der Algorithmen / Limitierungen einzelner Sensoren
Modellierung	probabilistisch, Erwartungswert mit Varianzen/Kovarianzen	probabilistisch über Detektionswahrscheinlichkeiten	keine durchgehende Methode, zurzeit vorwiegend heuristisch
Methoden	geschlossene Theorie über allgemeines Bayes-Filter (z. B. Variante Kalman-Filter)	geschlossene Theorie, gekoppelt an Schätzung Zustandsunsicherheit (z. B. JIPDA-Filter)	<i>merkmalbasiert:</i> Bayes, Dempster-Shafer, <i>lernbasiert:</i> Neuronale Netze, kaskadierte Verfahren (Viola und Jones etc.)
Prädiktion in die Zukunft	generell nein, bedingt möglich über Trendaussagen	generell nein	generell nein

20.3.5 Zusammenfassende Bewertung

Aus den Betrachtungen wird deutlich, dass die maschinelle Wahrnehmung drei wesentliche Unsicherheitsdomänen umfasst, nämlich die Zustandsunsicherheit, die Existenzunsicherheit und die Klassenunsicherheit. Alle Domänen haben direkten Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der maschinellen Wahrnehmung. Werden die Unsicherheiten zu hoch, wobei funktionspezifisch festzulegen ist, welche Unsicherheiten noch tolerabel sind, ist keine sichere Führung eines automatisierten Fahrzeugs mehr möglich.

Problematisch ist, dass eine zukünftig höhere Unsicherheit und damit eine größere Fehlerwahrscheinlichkeit nicht zeitlich vorhergesagt werden kann. 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. Lediglich Trendaussagen sind möglich. Die folgende Tab. 20.1 fasst die Ergebnisse noch einmal zusammen.

20.4 Folgerungen für die maschinelle Wahrnehmungsleistungsprädiktion

Wie in den vorherigen Abschnitten ausgeführt und begründet, kann die zukünftige Entwicklung der maschinellen Wahrnehmungsleistung eines automatisierten Fahrzeugs aus grundlegenden Überlegungen heraus nicht mit ausreichender Konfidenz vorausgesagt werden. In keinem Fall kann die Wahrnehmungsleistung für den zur Übergabe der Fahraufgabe an den Menschen notwendigen Rückgabezeitraum von fünf bis zehn Sekunden unter allen Umständen sicher vorhergesagt werden, wie sie beim hochautomatisierten Fahren als Rückfalloption vorgesehen ist. Ein vollautomatisiertes Fahrzeug müsste autonom einen eigensicheren Zustand einnehmen können, wozu in einigen Fällen noch ein längerer Zeitraum erforderlich wäre als im Übernahmefall durch einen Fahrer. Obwohl es sicher einige Optionen der Prädiktion der zukünftigen Einschränkung der Wahrnehmungsleistungsfähigkeit aufgrund äußerer Bedingungen wie beispielsweise eine bevorstehende Kamerablendung durch eine tief stehende Sonne, Einschränkungen der Sensoren durch einsetzenden Regen, Schnee oder Nebelbänke gibt, sind dies spezielle Szenarien, die außerdem eine extrem robuste Kontextinformation benötigen. Somit ist eine Prädiktion der Wahrnehmungsleistungsfähigkeit prinzipbedingt keine generelle Option zur Gewährung der notwendigen Sicherheit beim automatisierten Fahren.

Wie oben ausgeführt, existieren jedoch bereits theoretisch fundierte Methoden und Verfahren, um die aktuelle maschinelle Wahrnehmungsleistung kontinuierlich zu überwachen und Systemausfälle sowie Degradationen einzelner Komponenten zeitnah und sicher erkennen zu können. Konzeptionell müssten daher maschinelle Wahrnehmungssysteme so ausgelegt werden, dass eine sensorische Redundanz vorhanden ist, die eine ausreichende Restfunktion der Wahrnehmungsleistung entweder bis zur Übergabe an den Fahrer oder im Fall des vollautomatisierten Fahrzeugs bis zum Erreichen eines eigensicheren Zustands bei Ausfall einzelner Komponenten gewährleistet. Ein komplettes Versagen der maschinellen Wahrnehmung darf daher nicht auftreten.

Derartige Redundanzen bieten grundsätzlich Multisensorsysteme, die Informationen verschiedener Sensoren und Sensorprinzipien parallel nutzen und fusionieren. Sind beispielsweise Radar- und Lidarsensoren verbaut, so liefern beide Entfernungsmessdaten, allerdings in unterschiedlicher Qualität und in einem unterschiedlichen Sensorerfassungsbereich. Auch die Witterungsabhängigkeiten der Sensorprinzipien sind unterschiedlich. Aufgrund der Ähnlichkeit der Messdaten können sie sich jedoch gegenseitig stützen bzw. bei geringer Einbuße der Messqualität des Gesamtsystems auch gegenseitig bei Ausfall einer Komponente kompensieren. Erst durch diese Nutzung unabhängiger Sensorprinzipien wird es zudem möglich sein, die im Rahmen der funktionalen Sicherheit für das automatisierte Fahren notwendige höchste Sicherheitsstufe gemäß des Automotive Safety Integrity Level (ASIL D) zu erreichen.

Bei Kameras kann ebenfalls leicht eine Redundanz vorgesehen bzw. hergestellt werden. Fällt beispielsweise eine Kamera eines Stereokamerasystems aus, so steht für Klassifikationsaufgaben und die Erkennung von Straßenmarkierungen noch die zweite Kamera des

Stereosystems zur Verfügung. Lediglich eine Entfernungsschätzung ist dann aus Stereodaten nicht mehr verfügbar und müsste beispielsweise durch Lidar- oder Radarsensoren kompensiert werden. Voraussetzung für diese Redundanz ist natürlich, dass die Verarbeitungshardware und grundlegende Software der Einzelkameras unabhängig, d. h. redundant ausgelegt sind. Alternativ könnte natürlich auch eine weitere Monokamera inklusive eigener Verarbeitungshardware und -software verbaut werden. Durch derartige Redundanzkonzepte kann somit auch bei Ausfall einzelner Komponenten immer eine Mindestwahrnehmungsleistung des automatisierten Fahrzeugs aufrechterhalten werden.

Die automatisierte Fahrzeugführung auf Bahnebene basiert auf der aktuellen maschinellen Wahrnehmung bzw. der darauf aufbauenden Prädiktion der aktuellen Verkehrssituation. Letztere erfolgt nach dem Stand der Technik im Wesentlichen durch eine einfache Prädiktion des aktuellen Bewegungsverhaltens der Objekte in die Zukunft. Aufgrund der Vielzahl der möglichen und nicht voraussehbaren Ereignisse, insbesondere reaktiver Aktionen anderer Verkehrsteilnehmer, steigen die Unsicherheiten der Situationsprädiktion nach etwa zwei bis drei Sekunden so stark an, dass hierauf keine verlässliche Trajektorienplanung mehr möglich ist. Die Situationsprädiktion kann daher auch nicht den Rückgabezeitraum zum Fahrer beim hochautomatisierten Fahren oder das Erreichen eines eigensicheren Zustands beim vollautomatisierten Fahren sicher überbrücken, falls die maschinelle Wahrnehmung das Fahrzeugumfeldmodell nicht mehr ständig aktualisiert.

Der Mensch ist aufgrund seiner Fahrerfahrung allerdings auch in der Lage, die Gesamtsituation für etwa zwei bis drei Sekunden in die Zukunft mit gewisser Sicherheit vorherzusagen [23]. Da der Mensch seine Umgebung aber quasikontinuierlich wahrnimmt und interpretiert, reicht dieser kurze Vorhersagehorizont völlig aus, adäquat und deeskalierend in nahezu allen Situationen zu reagieren und Unfälle in aller Regel zu vermeiden. Dies sollte also auch für automatisierte Fahrzeuge möglich sein, wobei hier natürlich zusätzlich Latenzen sowie Unsicherheiten in der Wahrnehmung zu berücksichtigen sind. Voraussetzung ist, wie oben erwähnt, eine garantierte Mindestleistungsfähigkeit der maschinellen Wahrnehmung.

Wesentlich für die Gesamtfunktion ist es allerdings, dass sich das automatisierte Fahrzeug erst gar nicht in eine technisch unlösbare Situation bringt. Die zulässige Kritikalität der Situation muss dabei immer der aktuellen maschinellen Wahrnehmungsleistung entsprechen. Es sind hierbei insbesondere auch plötzlich auftretende Ausfälle und damit eine spontane Reduktion der maschinellen Wahrnehmungsleistung zu berücksichtigen. Innerhalb der einigermaßen verlässlichen Prädiktionszeit für die Situationsentwicklung von zwei bis drei Sekunden muss das automatisierte Fahrzeug dann in der Lage sein, sein Fahrverhalten der geänderten maschinellen Wahrnehmungsleistung anzupassen. Ein einfaches Beispiel wäre das Fahren auf einem Fahrstreifen. Verringert sich durch technische Ausfälle oder Witterungseinflüsse die Sensorreichweite, muss das Fahrzeug in der Lage sein, seine Geschwindigkeit innerhalb der Gültigkeit der Prädiktion der aktuellen Situation anzupassen, was ein sicher lösbares technisches Problem darstellt.

Während diese einfache Situation leicht beschreibbar und untersuchbar ist, ist allgemein heute nicht bekannt, wie es zu kritischen Situationen kommt und was im Hinblick auf die

technische Leistungsfähigkeit eines automatisierten Fahrzeugs überhaupt als kritisch zu bewerten ist. Für die Absicherung automatisierter Fahrzeuge gewährleistet das Abfahren eines vordefinierten Kilometerumfangs in jedem Fall nicht, dass der dadurch entstehende Datensatz alle möglichen kritischen Situationsentwicklungen (Episoden) enthält. Folglich ist eine Absicherung der Funktionssicherheit auf diese Art und Weise nicht möglich, unabhängig davon, dass die zum statistischen Nachweis der sehr geringen Fehlerraten notwendigen Kilometerleistungen weder praktisch noch wirtschaftlich realisierbar wären.

Eine mögliche zukünftige Forschungsaufgabe wäre daher die Suche nach einer geeigneten mathematischen Repräsentation beliebiger Episoden, die dann den Raum aller möglichen Episoden aufspannen. Aufbauend auf dieser Beschreibung kann dann beispielsweise durch sogenannte Monte-Carlo-Simulationen der gesamte Episodenraum in kritische und unkritische Teilbereiche strukturiert werden, um hieraus eine Aussage zu notwendigen spezifischen Tests ableiten zu können. Ein möglicher methodischer Ansatz hierzu ist das Rejektion-Sampling, wobei jedes Sample eine vollständige Episode repräsentiert. Ausgehend von Grundepisoden, die sich beispielsweise durch unterschiedliche Fahrbahntypen (ein, zwei oder drei Fahrstreifen pro Richtung, Gegenverkehr) oder die Anzahl der Fahrzeuge im Nahbereich unterscheiden, werden durch statistische Variation der Episodenparameter ähnliche Situationen generiert. Bei einer hinreichenden Anzahl an Samples besteht die Erwartung, den Episodenraum vollständig abzudecken. Jede gezogene Episode wird dabei auf ihre physikalische Realisierbarkeit überprüft und irrelevante Episoden verworfen. Die verbleibenden Episoden werden anschließend dahingehend überprüft, ob sich beispielsweise kritische Zeitlücken oder Abstände zwischen Objekten ergeben. Die Kriterien hierfür sind ebenfalls geeignet festzulegen. Die Identifikation und Priorisierung kritischer Situationen erfolgt durch ein folgendes Clustern im Episodenraum.

Ziel eines solchen Vorgehens wäre es, durch die hierarchische Vorgehensweise eine möglichst vollständige, aber dennoch handhabbare Menge potenziell kritischer Episoden zu bestimmen. Diese werden im Anschluss anhand simulierter Daten hinsichtlich der Beherrschbarkeit durch das hochautomatisierte System bei verschiedenen Stufen der maschinellen Wahrnehmungsleistung untersucht. Beispielsweise könnten für ein Sensor-Setup im Fahrzeug individuelle Reichweiten, Erfassungswinkel und Detektionsraten modelliert werden, um dann systematisch die Konsequenzen für das Verhalten des Fahrzeugs in kritischen Episoden zu untersuchen. Diese Untersuchung kann zunächst für ein voll funktionsfähiges System und im Anschluss unter der Annahme eines Ausfalls von Einzelkomponenten durchgeführt werden.

Eine weitere offene Forschungsfrage ist die nach einer zuverlässigeren Situationsprädiktion, die unter Nutzung von Kontextinformationen und Hypothesen über das zukünftige Verhalten der Verkehrsteilnehmer prinzipiell längere Prädiktionszeiträume ermöglicht. Eine derartige Vorgehensweise wäre insofern gerechtfertigt, als dass unser gesamter Verkehr auf der Kooperation der Verkehrsteilnehmer beruht. Nachteilig hieran wäre natürlich, dass ein unkooperatives Verhalten oder auch schlicht Fehler anderer Verkehrsteilnehmer dann natürlich nicht erwartet und in die Handlungsplanung eines automatisierten Fahrzeugs mit einbezogen werden können. Insofern erlauben solche Ansätze keine weitreichende

Erweiterung des sicher prädizierbaren Zeitraums, können aber Planungsalgorithmen dennoch unterstützen. Ferner ist anzumerken, dass manuelle Fahrer auch in vielen Situationen keine Chance haben, geeignet zu reagieren, wenn sich andere Fahrzeugführer nicht regelgerecht verhalten oder unvorhergesehene Fahrfehler begehen. Insofern müssen auch an automatisierte Fahrzeuge sicher keine zu übertriebenen Anforderungen gestellt werden. Dies ist aber natürlich eine Frage des gesellschaftlichen Konsenses hinsichtlich des zulässigen Gefährdungspotenzials einer neuen Technologie.

20.5 Zusammenfassung

Die existierenden Methoden der Zustands- und Existenzschätzung basieren auf einer geschlossenen, fundierten Theorie und erlauben schritt haltend eine zuverlässige Bewertung der aktuellen Güte der maschinellen Wahrnehmungsleistung. Hiermit ist es möglich, Komplettausfälle einzelner Sensoren sowie eine schleichende Degeneration in der Sensorik und/oder Wahrnehmung festzustellen.

Die Verfahren erlauben jedoch keine Vorhersage der zukünftigen Wahrnehmungsleistung, lediglich ein lineares Fortschreiben von erkannten Trends ist denkbar. Die Zuverlässigkeit und Güte der Bewertung der maschinellen Wahrnehmungsleistung ist von verfügbaren Sensormodellen abhängig, insbesondere von Fehlermodellen, die sensor- und herstellerspezifisch sind. Die Wahrnehmungssysteme allein besitzen keine ausreichende Prädiktionsfähigkeit, die einen Zeithorizont zwischen fünf und zehn Sekunden sicher abdecken könnte, so wie er heute für den Rückgabefall des hochautomatisierten Systems an den Fahrer angesehen wird. Dies ist allerdings für ein sicheres Verhalten eines automatisierten Fahrzeugs vermutlich auch gar nicht notwendig. Entscheidend für die Beherrschbarkeit von Situationen beim automatisierten Fahren sind ausreichend viele, physikalisch umsetzbare und sichere Handlungsoptionen des automatisierten Fahrzeugs. Diese sind im Wesentlichen durch die räumliche Nähe von begrenzenden Objekten zum eigenen Fahrzeug und den verfügbaren, befahrbaren Freiraum bestimmt, sodass räumliche Nähe unter Einbeziehung von Unsicherheiten in der Wahrnehmung und die Zahl der physikalisch möglichen, sicheren Handlungsoptionen in Kennzahlen zur Bewertung einer Kritikalität einfließen müssen. Auch muss die aktuell verfügbare maschinelle Wahrnehmungsleistung hierin Berücksichtigung finden. Derartige ausreichend abgestimmte und theoretisch fundierte Kritikalitätsmaße existieren heute noch nicht.

Eine Situationsprädiktion in die Zukunft über einen Zeitraum von zwei bis drei Sekunden hinaus wird bei rein modellbasierter, probabilistischer Fortschreibung keine Aussage mehr liefern, da jede Entwicklung der Situation möglich ist. Ein möglicher Lösungsansatz und eine zukünftige Forschungsfrage ist die kontextbezogene, hypothesenbasierte zeitliche Fortschreibung einer erkannten und bewerteten Situation. Eine Möglichkeit ist hier, in Anlehnung an das menschliche Verhalten, Situationsepisoden, d. h. reale Entwicklungen aus einem beliebigen Anfangsstand im Fahrbetrieb, zu erfassen, zu clustern und in einer Wissensbasis zu hinterlegen. Bei vorhandener Wissensbasis kann dann ständig die aktuel-

le Situation in Bezug auf den vermeintlichen Ausgang der Entwicklung bewertet werden. Hierfür existieren zurzeit keine gesicherten Methoden, teilweise nicht einmal Ideen zur Realisierung. Es scheint jedoch ein Weg zu sein, der begangen werden kann.

Die Fortschritte zur Situationsprädiktion lassen sich extrem schwer voraussagen. Signifikant leistungsfähigere Verfahren sind aber vermutlich nur in einem Zeithorizont von zehn Jahren und mehr zu erwarten.

Literatur

1. Damböck, D.; Bengler, K.; Farid, M.; Tönert, L.: Übernahmezeiten beim hochautomatisierten Fahren. Tagungsband der VDI-Tagung Fahrerassistenz in München, Jahrgang 15, Seite 16ff, 2012
2. Gold, C.; Damböck, D.; Lorenz, L.; Bengler, K.: "Take over!" How long does it take to get the driver back into the loop? In Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, Vol. 57, No. 1, pp. 1938–1942, 2013
3. Winner, H.; Hakuli, S.; Wolf, G. (Eds.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort, 2. Auflage (2012), Teubner Verlag
4. Nuss, D.; Reuter, S.; Konrad, M.; Munz, M.; Dietmayer, K.: Using grid maps to reduce the number of false positive measurements in advanced driver assistance systems. IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2012, pp.1509–1514
5. Bouzouraa, M.; Hofmann, U.: Fusion of occupancy grid mapping and model based object tracking for driver assistance systems using laser and radar sensors. IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2010, pp. 294–300
6. Coué, C.; Pradalier, C.; Laugier, C.; Fraichard, T.; Bessiere, P.: Bayesian Occupancy Filtering for Multitarget Tracking: an Automotive Application. International Journal of Robotics Research, 2006, Vol. 25.1, pp.19–30
7. Konrad, M.; Szcot, M.; Schüle, F.; Dietmayer, K.: Generic grid mapping for road course estimation. IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2011, pp. 851–856
8. Schmid, M.R.; Mählich, M.; Dickmann, J.; Wünsche, H.-J.: Dynamic level of detail 3d occupancy grids for automotive use. IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2010, pp. 269–274
9. Kalman, R.: A new approach to linear filtering and prediction problems. Transactions of the ASME – Journal of Basic Engineering, 1960, Vol. 82, pp. 35–45
10. Mahler, R.: Statistical Multisource-Multitarget Information Fusion. Artech House, Boston, 2007
11. Bar-Shalom, Y.; Tse, E.: Tracking in a cluttered environment with probabilistic data association. Automatica, 1975, Vol. 11, pp. 451–460
12. Bar-Shalom, Y.; Fortmann, T.: Tracking and Data Association. Academic Press, Boston, 1988
13. Musicki, D.; Evans, R.: Joint Integrated Probabilistic Data Association: JIPDA, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2004, Vol. 40.3, pp. 1093–1099
14. Munz, M.: Generisches Sensorfusionsframework zur gleichzeitigen Zustands- und Existenzschätzung für die Fahrzeugumfelderfassung. PhD Thesis, Ulm University, 2011
15. Nuss, D.; Stuebler, M.; Dietmayer, K.: Consistent Environmental Modeling by Use of Occupancy Grid Maps, Digital Road Maps, and Multi-Object Tracking. IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2014
16. Shafer, G.: A Mathematical Theory of Evidence. Princeton University Press, 1976
17. Reuter, S.; Wilking, B.; Wiest, J.; Munz, M.; Dietmayer, K.: Real-time multi-object tracking using random finite sets. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2013, Vol. 49.4, pp. 2666–2678

18. Vo, B.-T.; Vo, B.-N.: Labeled Random Finite Sets and Multi-Object Conjugate Priors. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2013, Vol. 61, 3460–3475
19. Reuter, S.; Vo, B. T.; Vo, B. N.; Dietmayer, K.: The labeled multi-Bernoulli filter. *Signal Processing, IEEE Transactions on*, 62(12), pp. 3246–3260, 2014
20. Viola, P.; Jones, M.: Rapid object detection using a boosted cascade of simple features. In *Computer Vision and Pattern Recognition, 2001. CVPR 2001. Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on (Vol. 1, pp. I–511)*. IEEE
21. Egmont-Petersen, M.; de Ridder, D.; Handels, H.: Image processing with neural networks – a review. *Pattern recognition*, 35(10), pp. 2279–2301
22. Zhang, G. P. : Neural networks for classification: a survey. *Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on*, 30(4), pp. 451–462
23. Godthelp, H.; Milgram, P.; Blaauw, G. J.: The development of a time-related measure to describe driving strategy. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 26(3), 1984, pp.257–268

Walther Wachenfeld, Hermann Winner

Inhaltsverzeichnis

21.1 Einleitung	440
21.2 Aktuelle Testkonzepte in der Automobilindustrie	443
21.3 Anforderungen an ein Testkonzept	447
21.3.1 Effektivitätskriterien	447
21.3.2 Effizienzkriterien	448
21.4 Besonderheiten des autonomen Fahrens	449
21.4.1 Vergleich zwischen aktueller Automatisierung und Vollautomatisierung der Straßenfahrzeuge	449
21.4.2 Vergleich der Bedingungen in der Luftfahrt, im Straßenverkehr und im Eisenbahnverkehr	451
21.5 Freigabeherausforderung für das vollautomatisierte Fahren (Freigabefälle)	451
21.5.1 Aussagekraft des aktuellen Testkonzepts für das autonome Fahren	453
21.5.2 Millionen Kilometer auf öffentlichen Straßen bis zur Freigabe des vollautomatischen Fahrens	454
21.6 Ansätze für das Lösen der Freigabeherausforderung	458
21.6.1 Wiederverwenden freigegebener Funktionen	458
21.6.2 Beschleunigung der Freigabe	459
21.7 Fazit	462
Literatur	463

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

21.1 Einleitung

Die Funktionen des autonomen Fahrens könnten in Zukunft den gesamten Straßenverkehr grundlegend verändern; dafür müssen diese in einer großen Stückzahl und somit als Serienprodukte zum Einsatz kommen. Im Allgemeinen ist für den Übergang eines technischen Systems von der Entwicklungsphase in die Serienproduktion die Freigabe dieses Systems notwendig [1]. Nach den Grundsätzen des Projektmanagements erfolgt die Freigabe erst dann, wenn die zuvor definierten Anforderungen von diesem technischen System erfüllt werden. Diese Anforderungen haben unterschiedlichste Ursprünge, wie beispielsweise Kunden, Normen oder Gesetze. Verschiedene Bereiche werden durch die Anforderungen adressiert: Darunter fallen nicht zuletzt aus Gründen der Typgenehmigung¹ als auch der Produkthaftung² Anforderungen an die Sicherheit des technischen Systems.

Die Sicherheit des Menschen im öffentlichen Straßenverkehr ist eine der viel zitierten Motivationen für die Fahrzeugautomatisierung, denn die weit überwiegende Zahl der aktuellen Unfälle wird durch den menschlichen Fahrer verursacht. Aus dieser Motivation folgt die Anforderung, dass die Substitution des Menschen die Sicherheit im öffentlichen Straßenverkehr nicht mindert. Dies soll sowohl für den Insassen als auch für das gesamte Verkehrssystem gültig sein, in dem sich das autonome Fahrzeug bewegt. Was diese Anforderung bedeutet und ob sie tatsächlich bei Einführung gestellt wird, steht im Fokus der folgenden Diskussion.

Überlegungen von Gasser et al. [4] liefern hierzu einen Einstieg: Der Bericht der Bundesanstalt für Straßenwesen betrachtet die Entwicklung der Unfallzahlen mit Einführung der Fahrzeugautomatisierung. Ausgehend von der Gesamtzahl der Unfälle bei konventioneller Fahrzeugführung (s. Abb. 21.1 blaues und grünes Feld) wird angenommen, dass Unfälle (grünes Feld) durch die Fahrzeugautomatisierung vermieden werden. Zusätzlich könnten jedoch neue Unfälle aufgrund von Automatisierungsrisiken entstehen (gelbes Feld).

Bei dieser Darstellung wird nicht nach der Schwere des Unfalls unterschieden; jedoch ist die Schwere eines Unfalls bei Betrachtung der Auswirkungen auf die Sicherheit ebenfalls von Relevanz. Sicherheit wird allgemein als Abwesenheit von unangemessenen Risiken beschrieben. Dieses Risiko ist definiert als Produkt aus Wahrscheinlichkeit für einen Unfall und Schadensschwere infolge des Unfalls.

Abb. 21.2 illustriert dieses theoretische Risikovermeidungspotenzial abhängig von der Schwere eines Unfalls in qualitativer Weise. Sie folgt dabei den Erkenntnissen von

1 Im Sinne der Richtlinie 2007/46/EG [2] bezeichnet der Ausdruck „... ‚Typgenehmigung‘ das Verfahren, nach dem ein Mitgliedstaat bescheinigt, dass ein Typ eines Fahrzeugs (...) den einschlägigen Verwaltungsvorschriften und technischen Anforderungen entspricht“.

2 Reuter schreibt: „Die (deliktische) Produkthaftung dient dem Schutz von jedermann (Produkt-nutzer sowie unbeteiligte Dritte) vor unsicheren Produkten. Die Produkthaftung regelt den Ersatz von Folgeschäden, die als Folge der Verletzung von Gesundheit oder Eigentum durch Produktfehler verursacht wurden.“ [3]

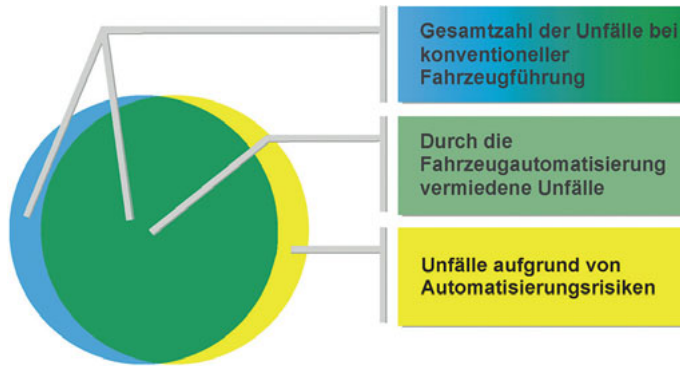


Abb. 21.1 Theoretisches Unfallvermeidungspotenzial bei Fahrzeugautomatisierung [4]

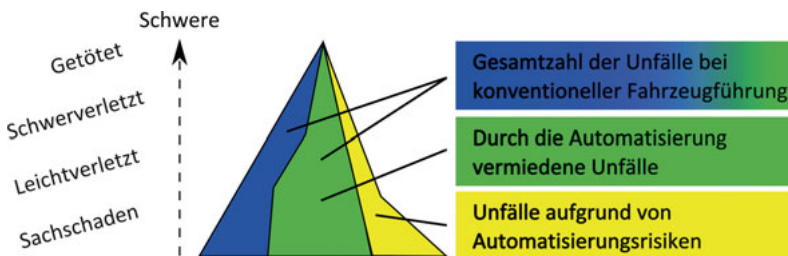


Abb. 21.2 Theoretisches Unfallvermeidungspotenzial bei Fahrzeugautomatisierung unter Berücksichtigung der Unfallschwere (nach [4])

Heinrich [5] und Hydén [6], dass Unfälle mit abnehmender Schwere in größerer Zahl auftreten. Die Skala der zugehörigen Schwere des Unfalls ist ordinal, d. h., eine Ordnung zwischen den verschiedenen Schweregraden ist eindeutig vorhanden: Ein Getöteter wiegt beispielsweise schwerer als ein Schwerverletzter. Das Verhältnis zwischen den Stufen ist jedoch in der Wissenschaft strittig. Zwar werden Schweregrade über Kosten verglichen, dies ist jedoch umstritten und wird in dieser Arbeit nicht weiter diskutiert.

Aus der Betrachtung von Schwere und Anzahl folgt, dass zwar Risiken behoben werden (s. Abb. 21.2 grüner Bereich), aber auch weiterhin Risiken existieren (s. Abb. 21.2 blauer Bereich), die nicht durch die Fahrzeugautomatisierung adressiert werden. Zusätzlich entstehen neue Risiken durch die Substitution des Menschen und die automatisierte Ausführung der Fahrzeugführung. Der Mensch steht nicht mehr als Rückfallebene im Fall eines Fehlers oder einer Unzulänglichkeit zur Verfügung. Abb. 21.2 stellt dieses zusätzliche Risiko durch den gelben Bereich dar. Hierbei ist ungewiss, ob das Beheben von Risiken und das Entstehen zusätzlicher Risiken über die Schwere gleichmäßig erfolgt. Möglich ist eine stärkere Abnahme von schweren Unfällen, aber eine Zunahme von leichteren Unfällen. Abb. 21.2 zeigt diesen Gedanken mithilfe der Verformung des angenommenen Dreiecks.

Für die Freigabe des vollautomatisierten Fahrens bedeutet dies, dass nicht nur eine Reduktion der Unfallzahlen nachzuweisen ist, sondern ein akzeptiertes Verhältnis V_{akz} zwischen vermiedenen R_{ver} und zusätzlich hervorgerufenen Risiken R_{zus} .

$$V_{akz} = \frac{R_{zus}}{R_{ver}}$$

Entgegen vieler Aussagen ist bisher noch nicht nachgewiesen, dass ein Verhältnis kleiner eins tatsächlich für die Freigabe notwendig ist. Werden autonome Fahrzeuge tatsächlich die Verkehrssicherheit erhöhen? Wäre das Verhältnis größer eins, würde durch das System die Verkehrssicherheit reduziert. Heute existieren Beispiele, bei denen ein entsprechender Zusatznutzen Akzeptanz für zusätzliche Risiken schafft: Das Erleben von Freiheit, Fahrspaß usw. wiegt beispielsweise für viele Motorradfahrer das erhebliche Zusatzrisiko gegenüber anderen Fortbewegungsmitteln auf, wobei der Akzeptanz des Motorradfahrens die Verteilung von Nutzen und Risiko zugutekommt. Der Zusatznutzen sowie das Zusatzrisiko betreffen überwiegend die Person auf einem Motorrad. Das von einem Motorrad ausgehende Risiko für andere Verkehrsteilnehmer liegt zwischen den Risiken, die von Fahrrad und Pkw ausgehen, sodass Motorradfahren auch ohne Zusatznutzen für andere Verkehrsteilnehmer akzeptabel ist.

In diesem Beitrag wird *kein* konkreter Wert des akzeptablen Verhältnisses für autonomes Fahren ermittelt, denn dieser Wert ist das Ergebnis einer vielschichtigen Diskussion der Beteiligten, die vom autonomen Fahren betroffen wären. Dieser Wert variiert, bedingt durch unterschiedliche Faktoren wie etwa gesellschaftliche, politische und ökonomische Unterschiede. Ein anschauliches Beispiel hierfür ist die Akzeptanz des Einsatzes von Atomenergie in Deutschland, den USA oder Japan über die letzten Jahre hinweg: Zum einen unterscheidet sich das akzeptierte Verhältnis zwischen den Ländern grundlegend und zum anderen verändert es sich über die Zeit, sodass beispielsweise in Deutschland 2012 der Ausstieg aus der Atomenergie beschlossen wurde.

Das Zentrum dieses Beitrags bildet die Bewertung des autonomen Fahrens, also die Frage nach Methoden, die eine Freigabe ermöglichen sollen. Auch wenn eine Vielzahl von Arbeiten die Potenziale des autonomen Fahrens theoretisch beschreiben, ist den Autoren keine Untersuchung bekannt, die diese Bewertung erbracht hat. Um zu zeigen, warum dies so ist, werden zunächst die aktuellen Freigabekonzepte in der Automobilindustrie beschrieben und anschließend dargestellt, welche Anforderungen an Testkonzepte bestehen. Im dritten Abschnitt werden die Besonderheiten des autonomen Fahrens im Verhältnis zu aktuellen Systemen beschrieben. Basierend darauf wird im vierten Abschnitt die besondere Herausforderung für eine Freigabe des autonomen Fahrens hergeleitet. Die Ansätze, die diese Herausforderung adressieren, werden diskutiert, um im letzten Abschnitt ein Fazit zur Freigabe von autonomen Fahrzeugen zu ziehen.

21.2 Aktuelle Testkonzepte in der Automobilindustrie

Freigabekonzepte, die aktuell in der Automobilindustrie eingesetzt werden, erzielen Freigaben für vier verschiedene Automatisierungsstufen. Um den Unterschied für die Freigabe dieser Systeme im Vergleich zum autonomen Fahren herzuleiten, werden diese vier Systeme kurz erläutert:

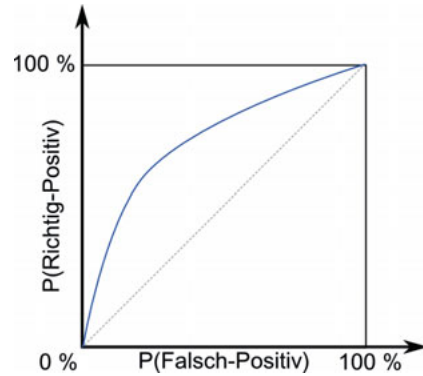
Das erste System in Serie ist das Driver-Only-Fahrzeug ohne Automatisierung der Fahraufgabe. Bei diesen Systemen wird auf der einen Seite gezeigt, dass eingesetzte Komponenten maximale Ausfallwahrscheinlichkeiten (*Failure Rate*) nicht überschreiten und auf der anderen Seite der Fahrer in der Lage ist, das Fahrzeug sicher im Straßenverkehr zu bewegen (*Controllability*). Dabei wird auf die Fähigkeiten des Fahrzeugführers vertraut, denn die Ergebnisse von ausgeführten Tests mit Testfahrern werden auf zukünftige Nutzer im späteren Einsatzbereich übertragen. Dies hat sich während der letzten Jahrzehnte als erfolgreich erwiesen, um Sicherheit nachzuweisen. Trotz steigender Fahrkilometer im Straßenverkehr bleibt die Anzahl an Unfällen konstant bzw. ist die Zahl tödlich Verunglückter sogar rückläufig.

Die zweite Stufe der in Serie vorhandenen Automatisierung ist das assistierende System: Für Systeme wie Adaptive Cruise Control (ACC) oder Lane Keeping Assist (LKA) ist zusätzlich zum bestehenden Umfang die Funktion dieser Systeme entsprechend dem ADAS Code of Practice [7] abzusichern. Dabei ist für Systeme, die die primäre Fahraufgabe aktiv unterstützen, den Komfort erhöhen und die Belastung reduzieren, vor allem die Kontrollierbarkeit und die Möglichkeit zur Übernahme zu gewährleisten. Der Code of Practice [7] geht bei diesen ADAS davon aus, dass der Fahrer die Verantwortung für das Verhalten des Fahrzeugs behält. Für diese Systeme gilt erneut, dass auf die Fähigkeiten des Fahrzeugführers vertraut wird, sodass die Ergebnisse von ausgeführten Tests mit Testfahrern auf den späteren Einsatzbereich mit zukünftigen Nutzern übertragen werden.

Ebenfalls freigegeben für den Einsatz in Serienfahrzeugen wurden erste teilautomatisierte Systeme: ACC in Verbindung mit LKA übernimmt abhängig von der Geschwindigkeit Quer- und Längsführung für den Fahrer. Gemäß Definition obliegt die Verantwortung des Fahrzeugverhaltens auch für die dritte Kategorie von Systemen dem Fahrer. Dementsprechend stehen auch für diese Freigabe die Möglichkeit zur Übernahme und die Kontrollierbarkeit durch den Fahrer im Fokus; somit gilt der gleiche Grundsatz wie für das assistierende System, der auf die Fähigkeiten des Fahrzeugführers zur Korrektur von ungewünschtem Automatisierungsverhalten vertraut. Diese Stufe der Automatisierung besitzt die besondere Herausforderung für die Freigabe, die aus dem Konflikt zwischen Entlastung des Fahrers und notwendigem Situationsbewusstsein des Überwachers von Quer- sowie Längsführung folgt. Jedoch liegt auch hierbei letztlich die Verantwortung beim Fahrer.

Von besonderem Interesse für die Freigabe sind Notreaktionssysteme, die automatisiert in die Fahrzeugregelung und somit in die Fahrdynamik eingreifen. Ziel dieser vierten Kategorie von Systemen ist es, dem Kontrollverlust des Fahrers über die Situation entgegenzuwirken. Beispielsweise sind Electronic Stability Control (ESC) und Emergency Brake Assist (EBA) Teile mechatronischer Bremssysteme und bauen ohne Aktion des

Abb. 21.3 Prinzipdarstellung einer Receiver-Operating-Characteristic-Kurve (nach [8])



Fahrers zusätzliche Bremskraft auf bzw. ab und greifen somit aktiv in die Fahrdynamik ein. Dies geschieht während des Kontrollverlusts durch den Fahrer, wenn das Fahrzeug in Verbindung mit dem Fahrer einem erhöhten Risiko ausgesetzt ist. ESC wird so ausgelegt, dass eingegriffen wird, wenn das Fahrzeug vom Fahrer in der aktuellen Situation offensichtlich nicht mehr beherrscht wird (z. B. bei sehr starkem Über- oder Untersteuern). Der EBA wird hingegen dann aktiv, wenn Reaktionszeit und Bremsweg bis zu einem Auffahrunfall für den Menschen nicht mehr ausreichen, diesen Unfall zu verhindern. Ziel für die Absicherung ist es zu zeigen, dass Notreaktionssysteme möglichst nur dann aktiv werden (Richtig-Positiv-Rate), wenn der Kontrollverlust offensichtlich wird und somit ein stark erhöhtes Risiko herrscht. Dafür ist zu zeigen, dass die Falsch-Positiv-Rate möglichst klein wird und/oder die Auswirkungen vom Fahrer kontrolliert werden können; Falsch-Positiv- und Falsch-Negativ-Raten der EBA hängen vor allem von der Objekterkennung ab. In Abb. 21.3 ist eine Receiver-Operating-Characteristic-Kurve (ROC-Kurve) dargestellt, die diesen Zusammenhang für die Objekterkennung beschreibt.

Da es sich bei diesen Notreaktionssystemen um Systeme ohne Funktionsversprechen handelt, kann eine Erhöhung der Sicherheit durch Reduktion des Nutzens und eine kleinere Falsch-Positiv-Rate erzielt werden. Zusätzlich ermöglichen diese Systeme auch ein Übersteuern. ESC und EBA greifen über das gezielte Abbremsen von Rädern nur in ein Stellsystem ein und können mit unterschiedlichen Strategien durch Lenken und/oder Beschleunigen übersteuert werden.

Wie gezeigt wurde, steht bei der Entwicklung der vier Systemstufen die Kontrollierbarkeit durch den Fahrer im Mittelpunkt: Entweder geht es darum, dem Fahrer die Kontrollierbarkeit zu ermöglichen oder sie für ihn wiederherzustellen (*Design for Controllability*). Der Fahrer als Rückfallebene ist somit Grundlage für die Absicherung aktueller Fahrzeuge.

Die Entwicklung und der Nachweis dieser Kontrollierbarkeit für den Fahrer erfolgt meist entsprechend dem Vorgehensmodell in Abb. 21.4. Dieses Vorgehen nach dem V-Modell unterscheidet zwischen dem linken absteigenden Ast der Entwicklung und Auslegung und dem rechten aufsteigenden Ast der Verifikation und Validierung als Mittel zur Qualitätssicherung. Für die Qualitätssicherung wird dabei einem Testkonzept gefolgt.

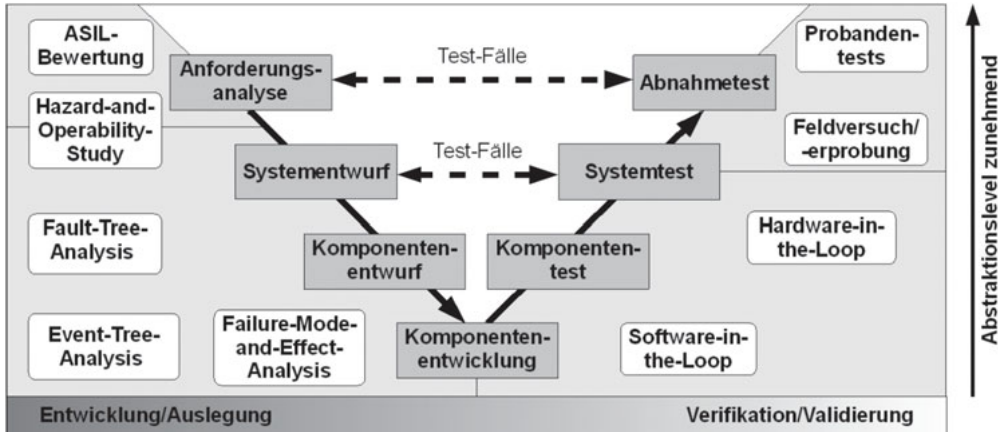
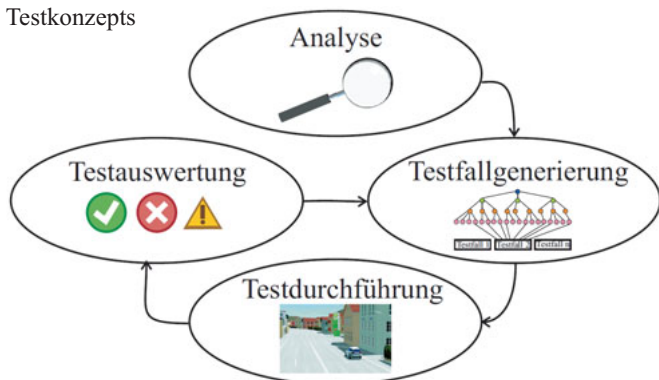


Abb. 21.4 Einordnung von Sicherheitsbewertungsmethoden im Entwicklungsprozess (nach [9])

Ein Testkonzept umfasst, wie von Schuldt et al. [10] in Abb. 21.5 dargestellt, die Analyse des Testobjekts (object under test – OUT), die Testfallgenerierung, die Testdurchführung sowie die Testauswertung.

Dabei sollten die Analyse des Testobjekts sowie die Testfallgenerierung bereits während der Entwicklungs-/Auslegungsphase stattfinden, sodass für die Verifikation und Validierung die durchzuführenden Testfälle bereits definiert sind (s. Abb. 21.4 V-Modell). Nach Horstmann [11] und Weitzel [9] wird aktuell für die Ermittlung von Testfällen zwischen drei Methoden unterschieden: Eine Methode ist die lastenheftbasierte Testspezifikation, bei welcher Testfälle basierend auf Systemspezifikationen definiert werden, die beispielsweise in Lastenheften festgehalten wurden. Die zweite Methode stellt die risikobasierte Testspezifikation dar, bei der Risikobetrachtungen für die Testfallermittlung eingesetzt werden. Als dritte Methode wird die schnittstellenbasierte Testspezifikation unterschieden, bei der die Testfälle so gewählt werden, dass sie die Wertebereiche der Schnittstellen entsprechend abdecken. Für alle Methoden ist das System Fahrer – Fahrzeug die Grundlage der Testfallermittlung.

Abb. 21.5 Vorgehensweise des Testkonzepts (nach [10])



Um mit der Qualitätssicherung möglichst frühzeitig zu beginnen, werden bereits, bevor die ersten Testfahrzeuge erprobungstauglich sind, Tests in virtuellen Testumgebungen durchgeführt. Die Testdurchführung mittels Modell- und Software-in-the-Loop prüft Funktionen basierend auf Simulationsmodellen des Fahrzeugs, des Menschen sowie des Umfelds. Dabei werden die zuvor identifizierten Testfälle eingesetzt. Je weiter die Entwicklung voranschreitet, desto mehr reale Komponenten stehen zur Verfügung, die einem Test unterzogen werden: Hierbei kommen Prüfstände, Fahrsimulatoren oder Testgelände zum Einsatz. Die Testdurchführung mittels Hardware-in-the-Loop, Driver-in-the-Loop oder Vehicle-in-the-Loop geben Auskunft über die Qualität der unter Test stehenden Komponenten und Funktionen. Um Aktion und Reaktion des Systems Fahrer – Fahrzeug – Umwelt zu überprüfen (den Loop zu schließen), werden auch für diese Testdurchführungen Simulationsmodelle eingesetzt. Daher werden bis zu diesem Entwicklungszeitpunkt für die Testdurchführung stets Simulationsmodelle benötigt, um das Gesamtfahrzeug zu testen. Simulationsmodelle sind Abbildungen der Realität in Software und haben per se die Eigenschaft, die Komplexität der realen Welt zu vereinfachen.

Diese Tatsache führt dazu, dass aktuell keine sicherheitsrelevante Funktion in einem Serienfahrzeug existiert, die nicht auch mit realen Testfahrzeugen überprüft wurde: Deshalb wird für aktuelle Systeme immer auf den Test mit realen Fahrzeugen, realen Menschen und realer Umwelt zurückgegriffen.

Aus dem notwendigen Einsatz der Realfahrt folgt, dass beispielsweise vor der Freigabe der Mercedes Benz E-Klasse (W212) insgesamt 36 Millionen Testkilometer absolviert wurden [12]³. Nach Fach et al. [13] bedarf allein die Freigabe eines aktuellen Fahrerassistenzsystems bis zu zwei Millionen Testkilometer. Wenn zwischen zwei Aktivierungen der ersten Stufe des EBA bei diesen Testfahrten 50 000 bis 100 000 Kilometer vergehen, wird diese große Zahl an Testkilometern nachvollziehbar. Dabei ist noch nicht berücksichtigt, dass die kritischere zweite Stufe des EBA während dieser Testkilometer gar nicht auslöste (s. Aussage in Abb. 21.3). Diese Testkilometer im zweistelligen Millionenbereich gehen einher mit beträchtlichen Kosten für Fahrzeugprototypen, Testfahrer, Testdurchführung sowie deren Auswertung. Der Zeitbedarf lässt sich zwar durch Parallelerprobungen mittels mehrerer Fahrzeuge reduzieren, jedoch entstehen hierbei zusätzliche Kosten für die Fahrzeugprototypen.

Dieses Beispiel zeigt, dass bereits für aktuelle Fahrerassistenzsysteme die Absicherung basierend auf Realfahrten im Straßenverkehr eine ökonomische Herausforderung für den OEM (engl. Original Equipment Manufacturer) darstellt. Besonders vor dem Hintergrund der zunehmenden Funktionalitäten und der Varianten- sowie Versionsvielfalt je Fahrzeugmodell wächst diese Herausforderung. Burgdorf [14] leitet beispielsweise eine Zahl von 160·2⁷⁰ Varianten für den BMW 318i (E90) mit Komponenten wie beispielsweise Karosserieform, Motor, Getriebe, Abtrieb, Farbe, Klima, Infotainment her.

3 „Hinter [der E-Klasse] liegen umfassende virtuelle Tests mit digitalen Prototypen und insgesamt 36 Millionen Testkilometer“

Deshalb gibt es bereits heute Bestrebungen, andere Testdurchführungen neben der Realfahrt für die finale Absicherung einzusetzen. Das einzige den Autoren dafür bekannte Beispiel betrifft die Homologation von ESC-Systemen. Nach EU-Verordnung ECE-Regelung 13H [15] besteht die Möglichkeit, diese teilweise in der Simulation durchzuführen:

Wenn ein Fahrzeug gemäß Absatz 4 physikalisch geprüft worden ist, kann die Übereinstimmung anderer Versionen oder Varianten desselben Fahrzeugtyps mittels Rechnersimulationen nachgewiesen werden, die die Prüfbedingungen des Absatzes 4 und die Prüfverfahren des Absatzes 5.9 einhalten.

Wohlgermerkt geht es hier allein um das ESC-System. Als Beispiel wird von Baake et al. [16] die Homologation von ESC-Systemen für Vans von Mercedes-Benz in Zusammenarbeit mit Bosch und IPG CarMaker beschrieben: Mithilfe von sogenannten Master Cars wurde in CarMaker ein Fahrzeugmodell erstellt; mit diesen Master Cars wurden Referenzdaten gesammelt und basierend darauf das Simulationsmodell validiert. Damit wurde die simulationsbasierte Empfehlung zur Freigabe für weitere Fahrzeugvarianten mit unterschiedlicher Beladung ermöglicht. Baake et al. berichtet zusätzlich vom Übertragen dieses Vorgehens auf die Funktion Cross Wind Assist (CWA), die jedoch noch nicht für die Absicherung zur Freigabe eingesetzt wurde.

21.3 Anforderungen an ein Testkonzept

Um im Folgenden zu diskutieren, warum die Vollautomatisierung eine besondere Herausforderung für die Freigabe darstellt, werden zunächst die Anforderungen an Testkonzepte für die Freigabe beschrieben. Diese sind unterteilt in Effektivitäts- und Effizienzkriterien.

21.3.1 Effektivitätskriterien

Repräsentativ – valide

Die Anforderung der Repräsentativität hat zwei Aspekte: Auf der einen Seite muss die Testfallgenerierung dafür sorgen, dass die nötige Testabdeckung erreicht wird. Ein Fahrzeug sollte beispielsweise nicht nur bei 20 °C und Sonnenschein getestet werden, da es im realen Einsatz auch Schnee, Regen und Temperaturen unter 0 °C ausgesetzt ist. Außerdem sollten Fahrzeuggrenzmuster (Toleranzen in der Produktion) bei der Testfallgenerierung betrachtet werden. Auf der anderen Seite muss die Testdurchführung den minimal notwendigen Grad an Realität aufweisen. Das bedeutet, dass die Vereinfachung in der Darstellung der Realität weder das Verhalten des Testobjekts noch das Verhalten und die Eigenschaften der Umwelt gegenüber dem realen Verhalten beeinflussen darf.

Variierbar

Die Testdurchführung muss die Möglichkeit bieten, alle von der Testfallgenerierung definierten Testfälle umzusetzen.

Beobachtbar

Besonders für die Testauswertung ist es notwendig, Parameter der Testdurchführung zu beobachten. Nur wenn die Situation auch beschrieben werden kann, besteht die Möglichkeit zur Aussage „Test bestanden“ oder „Test nicht bestanden“.

21.3.2 Effizienzkriterien**Ökonomisch**

Die Anforderung des ökonomischen Testkonzepts ist zweigeteilt: Zum einen sollte die Testdurchführung möglichst schnell vorbereitet und durchgeführt sein, um nach Möglichkeit die an der Entwicklung beteiligten Personen direkt mit einer Rückmeldung zum Testobjekt zu versorgen. Zum anderen ist darauf zu achten, dass die Testdurchführung möglichst kostengünstig vorbereitet und durchgeführt wird.

Reproduzierbar

Die Reproduzierbarkeit reduziert gravierend den Aufwand für Regressionstests. Wurde beispielsweise ein Fehler erkannt und das Testobjekt entsprechend modifiziert, ist das Ziel, das Testobjekt im gleichen Szenario erneut einem Test zu unterziehen.

Frühzeitig

Je früher im Entwicklungsprozess ein Produkt aussagekräftig getestet werden kann, desto weniger Entwicklungsschritte müssen bei einem eventuellen Fehler erneut durchlaufen werden.

Sicher

Die Testdurchführung sollte das akzeptierte Risiko aller Testbeteiligten nicht übersteigen. Dies ist besonders bei Realfahrten zu beachten, wenn Verkehrsteilnehmer dem Test ohne Kenntnis ausgesetzt werden.

Die beschriebenen Anforderungen werden durch die aktuellen Testkonzepte ausreichend erfüllt, sodass die vier vorgestellten unterschiedlichen Automatisierungsstufen damit freigegeben werden. Die Rückrufe aller OEM, die Millionen Fahrzeuge betreffen, sind jedoch ein Zeichen dafür, dass diese Testkonzepte keineswegs alles absichern. Sind diese Konzepte auch weiterhin geeignet, um neue Systeme wie das autonome Fahren für den öffentlichen Straßenverkehr abzusichern? An den vorgestellten Anforderungen ändert sich nichts. Wie im Folgenden beschrieben wird, ändert sich jedoch das Testobjekt gravierend.

21.4 Besonderheiten des autonomen Fahrens

Im Folgenden wird zunächst der Unterschied zwischen vollautomatisiertem und aktuellem Fahren im Straßenverkehr erläutert. Daran anschließend wird der Unterschied zwischen den Verkehrssystemen Luftfahrt, Eisenbahn und Straßenverkehr kompakt vorgestellt, der dazu führt, dass nur bedingt Erkenntnisse aus diesen Bereichen übertragen werden können.

21.4.1 Vergleich zwischen aktueller Automatisierung und Vollautomatisierung der Straßenfahrzeuge

Für die zuvor beschriebene Absicherung der vier in Serie vorhandenen Automatisierungsstufen stand das Fahrzeug und speziell dessen Kontrollierbarkeit durch den Fahrer im Fokus. In der kombinierten Darstellung des Drei-Ebenen-Modells für zielgerichtete Tätigkeiten des Menschen nach Rasmussen [17] und der Drei-Ebenen-Hierarchie der Fahraufgabe nach Donges [18] in Abb. 21.6 entspricht diese Absicherung den grün hinterlegten Elementen. Getestet werden das Fahrzeug und dessen Verhalten in Längs- und Querrichtung; dabei werden nicht das Verhalten oder die Fähigkeiten des zukünftigen Fahrers getestet, sondern ausschließlich die Möglichkeiten für den Testfahrer, mit Lenk- und Beschleunigungseingriffen das Fahrzeug in den Testfällen zu kontrollieren. Deshalb schneidet die grüne Box nur leicht den Bereich, der für den Fahrer steht.

Für die Vollautomatisierung fallen nun die Fähigkeiten des Fahrers weg, er fungiert auch nicht mehr als Rückfallebene. Die Fahraufgabe, also das Navigieren, Bahnführen und Stabilisieren/Regeln, wird vom Fahrroboter übernommen. Das bedeutet, für das autonome Fahren gibt es keinen Test der Kontrollierbarkeit, sondern ausschließlich den Test der Funktionalität eines technischen Systems. Auf der einen Seite erleichtert es den Test, denn die Unsicherheiten und individuellen Unterschiede des Menschen sind nicht mehr durch den Test abzudecken. Auf der anderen Seite entfällt die Möglichkeit, von Testfällen und Testfahrern auf weitere Anwendungsfälle zu schließen. Für das System entfällt der Mensch, der im Allgemeinen fertigkeitstestbasiert, regelbasiert sowie wissensbasiert handelt.

Für die Absicherung aktueller Systeme ist eine Sicherheit nachzuweisen, die sich durch Fahrer und das Fahrzeug in Kombination ergibt; für die Freigabe des Fahrzeugs steht dabei aber aktuell ausschließlich das Fahrzeug im Fokus. Zusätzlich angenommen, aber nicht getestet wird die „Zuverlässigkeit“ des Fahrers. Bei der Absicherung des autonomen Systems ergibt sich die Sicherheit nun ausschließlich aus dem technischen System Fahrroboter und Fahrzeug (gelbes Feld der Abb. 21.6), die es nachzuweisen gilt.

Aus Abb. 21.6 wird ersichtlich, dass dafür zum einen die Aufgabenquantität steigt, die es abzusichern gilt: Der Fahrroboter wird für die unterschiedlichsten Einsatzgebiete (s. Use-Cases Kap. 2) wie Navigieren, Bahnführen und Stabilisieren/Regeln benötigt. Diese Aufgabenquantität wird besonders im öffentlichen Raum ohne Zugangsbeschränkung eine Herausforderung. Auf der anderen Seite ändert sich die Aufgabenqualität des technischen Systems. Aktuelle Systeme sind lediglich ausführend bzw. ständig durch den

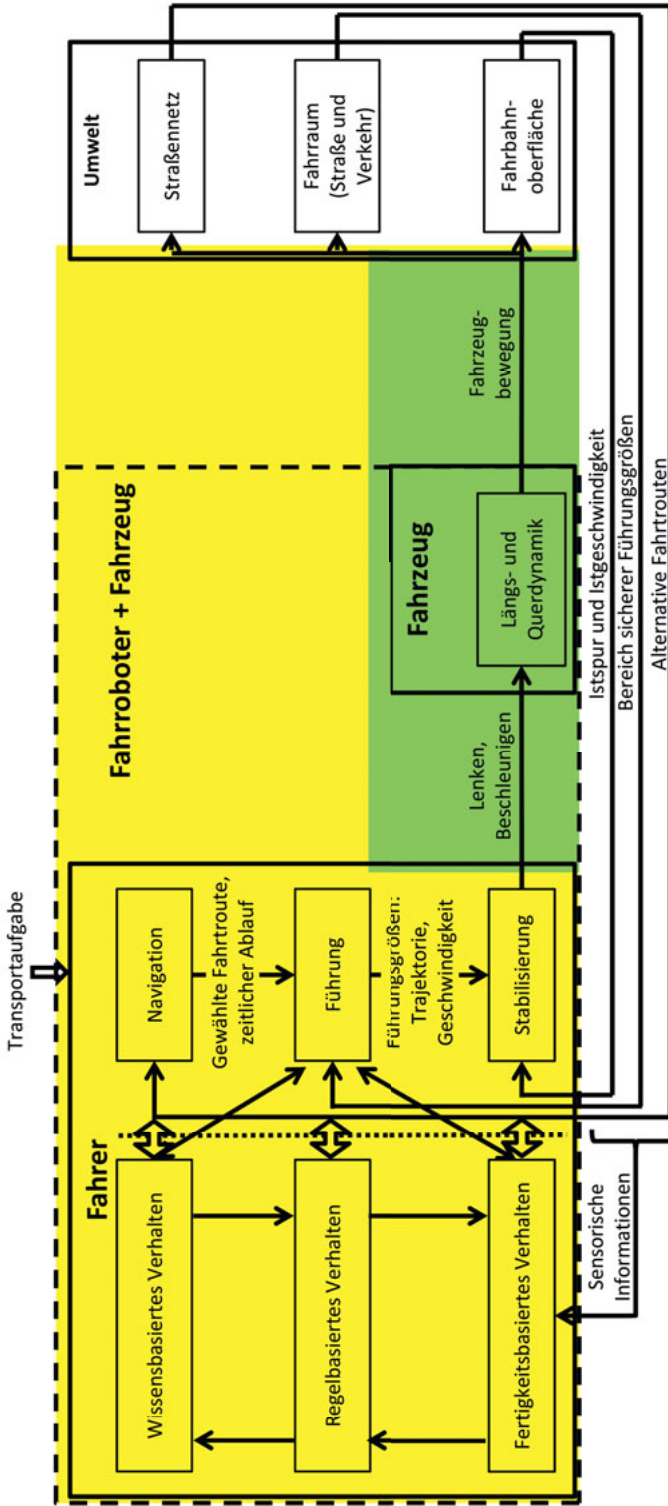


Abb. 21.6 Drei-Ebenen-Modell für zielgerichtete Tätigkeiten des Menschen nach Rasmussen und Drei-Ebenen-Hierarchie der Fahraufgabe nach Donges basierend auf [17, 18]

Menschen überwacht, für das autonome System muss die Ausführung einer Aufgabe jedoch den Ansprüchen an die zu Beginn diskutierte Sicherheit genügen.

21.4.2 Vergleich der Bedingungen in der Luftfahrt, im Straßenverkehr und im Eisenbahnverkehr

Neben dem Straßenverkehr existieren weitere Verkehrssysteme, bei denen die Automatisierung der Bedienung Einzug gehalten hat. Inwieweit jedoch die Herausforderungen und Lösungen aus diesen Bereichen auf die Fahrzeugautomatisierung übertragbar sind, wird im Folgenden diskutiert.

Die Automatisierung in der (zivilen) Luftfahrt liefert aktuell keine Beispiele der Vollautomatisierung. Auch wenn die Piloten nur äußerst selten tatsächlich der Flugaufgabe nachgehen, sind diese dennoch als Überwacher und Bediener vorhanden. Eine Übersicht über die Unterschiede der Verkehrssysteme findet sich in Tab. 21.1, die Weitzel et al. [9] und Ständer [19] entnommen wurde. Für die Absicherung ist diesbezüglich besonders das Sicherheitskonzept des Verkehrsablaufs von Interesse, denn hier zeigen sich die Unterschiede zwischen Luftfahrt und Straßenverkehr. Die Luftfahrt operiert in einem gesetzlich abgeschlossenen Verkehrsraum, ein Kollisionswarnsystem ist verpflichtend und eine externe Überwachung des Betriebs ist durch die Flugsicherung vorhanden.

Das Verkehrssystem der Eisenbahn bietet Beispiele der Vollautomatisierung: Beispielsweise wird in Nürnberg eine automatisierte U-Bahn betrieben. Jedoch unterscheidet sich auch für dieses Verkehrssystem nach Tab. 21.1 besonders das Sicherheitskonzept des Verkehrsablaufs zwischen Straßenverkehr und Eisenbahn. Für den Bahnverkehr existiert ein gesetzlich abgeschlossener Verkehrsraum, zusätzlich wird mit Logiksystemen und einer externen Überwachung gearbeitet, um die Kollision von zwei Zügen zu vermeiden.

Der Straßenverkehr als Mischbetrieb liefert die Bedingung des abgeschlossenen Verkehrsraumes und der externen Überwachung nicht. Diese Unterschiede zeigen, warum Lösungen für die Freigabe nicht direkt auf das autonome Fahren übertragen werden können.

Mit diesem Vergleich soll nicht ausgeschlossen werden, dass sämtliche Lösungen aus der Luftfahrt und dem Eisenbahnverkehr für den Straßenverkehr uninteressant sind. Sicherlich existieren ähnliche Problemstellungen wie beispielsweise die Zuverlässigkeit von sicherheitsrelevanten Komponenten.

21.5 Freigabeherausforderung für das vollautomatisierte Fahren (Freigabefälle)

Wie dargestellt wurde, unterscheidet sich die Funktion des autonomen Fahrens als Testobjekt grundlegend von den aktuellen Straßenfahrzeugen, aber auch von Bewegungsmitteln im Luft- und Eisenbahnverkehr. Deshalb wird nun ermittelt, welche Aussagekraft die vorgestellten aktuellen Testkonzepte übertragen auf das autonome Fahren besitzen

Tab. 21.1 Vergleich der Bedingungen der Verkehrssysteme (entnommen [9], basierend auf [18])

	Luftfahrt	Straßenverkehr	Eisenbahnverkehr
Bewegungsoptionen	3-D (Raum)	2-D (Fläche)	1-D (Linie)
Bediener			
verantwortlicher Fahrzeugführer	meist redundant	nicht redundant	nicht redundant
Professionalität der Fahrzeugführer	fast vollständig hauptberuflich	geringer Anteil hauptberuflich	fast vollständig hauptberuflich
Ausbildung			
Theorie	> 750 Stunden	> 21 Stunden	~ 800 Stunden
Praxis	> 1500 Stunden	> 9 Stunden	~ 400 Stunden
Schulung auf Fahrzeugtyp	ja	nein	ja
Weiterbildung	erforderlich	nicht erforderlich	erforderlich
Sicherheitskonzepte des Verkehrsablaufs			
Verkehrsraum abgeschlossen	gesetzlich festgelegte Begrenzungen	in Sonderfällen	gesetzlich festgelegte Begrenzungen
Fahrt auf Sicht	nein, nur in Sonderfällen	ja	nein, nur in Sonderfällen
technische Vorrichtungen (Beispiele)	Kollisionswarnsysteme verpflichtend	Fahrbahnmarkierung, Lichtsignalanlagen, Beschilderung	Sicherheitsfahrstellungen, punktförmige Zugbeeinflussung, automatische Fahr- und Bremssteuerung
externe Überwachung	ja, Flugsicherung	nein	ja, Fahrdienstleitung, Betriebszentrale
Technische Rahmenbedingungen			
Dokumentation Fahrten/ Betriebsstunden	ja	nein	Überwachung der Laufleistung, automatische Fahrtenschreiber
Instandhaltung, Reparatur	nur von zertifizierten Betrieben	Werkstätten, Selbsthilfe	nur von zertifizierten Betrieben, dann auch kleine Werkstätten
Unfallanalyse	jeder Unfall/ schwere Störung, durch unabhängige staatliche Stelle	in Einzelfällen, durch zertifizierte Gutachter	jeder Unfall/ schwere Störung, durch unabhängige staatliche Stelle
Stückzahlen (in Europa)	10 ³ (fallend)	10 ⁶ (steigend)	10 ³ (fallend, bei steigender Fahrleistung pro Triebfahrzeug)
Modellwechsel	ca. 20 Jahre	ca. 5–7 Jahre	ca. 20 Jahre für Triebfahrzeuge

würden. Des Weiteren wird diskutiert, welche Auswirkungen es hätte, wenn weiterhin am aktuellen Testkonzept festgehalten würde.

21.5.1 Aussagekraft des aktuellen Testkonzepts für das autonome Fahren

Es wurde bereits dargelegt, dass ein Testkonzept aus Testfallgenerierung und Testdurchführung besteht. Nun wird diskutiert, wie und ob beides auf das autonome Fahren übertragbar ist.

Testfallgenerierung

Die drei Verfahren zur Testfallgenerierung wurden in Abschn. 21.2 bereits kurz erläutert; diesen Verfahren liegt die Annahme der Fahrfähigkeit des Fahrers zugrunde. Ob ein beliebiger Fahrer das Testobjekt kontrollieren kann, wird an die gesetzlich vorgeschriebene Fahrerlaubnis geknüpft. Diese Fahrerlaubnis wird nach Straßenverkehrsgesetz (§ 2 Abs. 2 StVG) nur dann erteilt, wenn u. a. der Bewerber

- ein Mindestalter erreicht hat,
- zum Führen von Kraftfahrzeugen geeignet ist,
- ausgebildet wurde und
- theoretische wie praktische Tests bestanden hat.

Unter „geeignet“ wird nach § 2 Abs. 4 StVG Folgendes verstanden:

Geeignet zum Führen von Kraftfahrzeugen ist, wer die notwendigen körperlichen und geistigen Anforderungen erfüllt und nicht erheblich oder nicht wiederholt gegen verkehrsrechtliche Vorschriften oder gegen Strafgesetze verstoßen hat.

Aufgrund dieser geforderten Fahrfähigkeit des Fahrers wird die Testfallgenerierung auf Beispielsituationen beschränkt: Angenommen wird, dass, wenn der Testfahrer diese Beispielsituationen bewältigen kann, er bzw. jeder andere Fahrer mit Fahrerlaubnis auch die weiteren nicht getesteten relevanten Situationen im Einsatz bewältigen wird. Dazu gehören Situationen, in denen der Fahrer aktiv fährt, aber auch jene Situationen, in denen der Fahrer überwacht und das System gegebenenfalls übersteuert. Somit bieten die Testfälle in Kombination mit der Fahrerlaubnisprüfung eine Metrik, die eine Aussage über die Sicherheit des Systems Fahrer – Fahrzeug erlaubt. Wie die praktische Fahrerlaubnisprüfung als Bewertungsgrundlage zur Beurteilung der Fahrbefähigung optimiert werden könnte, wird von Bahr [20] diskutiert.

Durch den Wegfall des Fahrzeugführers entfällt die aktuell akzeptierte Metrik, und somit ist die Raffung der Testfälle nicht mehr zulässig. Die Testfallgenerierung für das autonome Fahren muss gerade die Fahrfähigkeiten – eine neue Qualität von Funktionen – abdecken, die der Mensch zuvor mit in das Fahrer-Fahrzeug-System eingebracht hat. Der theoretische und der praktische Test der Fahrerlaubnisprüfung stellen dabei nicht die Schwierigkeit dar.

Die folgenden Paragraphen – § 10 Mindestalter, § 11 Eignung und § 12 Sehvermögen der Fahrerlaubnis-Verordnung (FeV) – stellen jedoch die Herausforderung dar. Diese Paragraphen stehen damit implizit für umfassende Anforderungen an die Eigenschaften des Menschen, die Fahraufgaben auszuführen. Der Mensch, der diese Anforderungen erfüllt, hat

- als Verkehrsteilnehmer Hunderttausende von Kilometern erlebt,
- als Teil der Gesellschaft deren Sozialverhalten erfahren,
- kognitive Fähigkeiten erlernt,
- sensomotorische Fähigkeiten trainiert usw.

Aktuell ist den Autoren keine Methode bekannt, diese Funktionen für ein technisches System valide zu testen. Somit fallen die akzeptierte Metrik sowie die Raffung der Testfälle weg, wenn der Mensch aus der Verantwortung für die Fahraufgabenausführung genommen wird. Die aktuellen Testfälle besitzen für die Freigabe des autonomen Fahrens keine Aussagekraft, sodass die Testfallgenerierung an das neue System anzupassen ist.

Testdurchführung

Wie bereits dargelegt, werden für die Testdurchführung unterschiedliche Methoden von Hardware-in-the-Loop (HiL) über Software-in-the-Loop (SiL) bis zur Realfahrt eingesetzt. Dabei stellt die Realfahrt aktuell die wichtigste Methode für die Freigabe dar; Ursache hierfür ist vor allem die Validität bei bisher noch vertretbarem ökonomischem Aufwand. Das autonome Fahren stellt jedoch auch, neben dem ökonomischen Aufwand, für die bekannten Methoden eine systematische Herausforderung dar. Aktuell steht die Realfahrt für die Fahrt im öffentlichen Straßenverkehr mit Testfahrer. Die Aufgabe des Testfahrers ist es, entsprechend der Aufgabe des Fahrzeugnutzers das Fahrzeug in jeder Situation zu führen oder zu überwachen. Übertragen auf das autonome Fahren wäre der Einsatz des Testfahrers am Fahrerarbeitsplatz ein nichtreales Verhalten eines Nutzers, denn dieser muss eben nicht mehr das Fahrzeug und das Umfeld überwachen und eingreifen. Außerdem könnte das Fahrzeug auch ohne Insassen am Straßenverkehr teilnehmen (abhängig vom Use-Case), sodass ein Testfahrer eine nichtreale Komponente im Fahrzeug darstellen würde. Deshalb besteht die Gefahr, dass durch den Einsatz eines Testfahrers die anderen Verkehrsteilnehmer beeinflusst werden und ein verändertes Verhalten zeigen. Weitere Gedanken zu diesem Thema sind in Kap. 7 zu finden.

Somit ist neben der Testfallgenerierung auch die aktuelle Testdurchführung nicht direkt auf das autonome Fahren übertragbar.

21.5.2 Millionen Kilometer auf öffentlichen Straßen bis zur Freigabe des vollautomatischen Fahrens

Folgende theoretische Betrachtung wird zeigen, was es bedeutet, trotz aufgezeigter Unterschiede dennoch das aktuelle Testkonzept beizubehalten. Angenommen, eine Raffung der

Testfälle für das autonome Fahren ist nicht möglich, da keine Methode, ähnlich der Fahrerlaubnisprüfung des Menschen, existiert. Dennoch ist das Ziel, eine Aussage zu treffen, ob das Risiko durch den Einsatz des autonomen Fahrzeugs erhöht wird oder nicht:

$$V_{akz} = \frac{R_{zus}}{R_{ver}} < 1.$$

Hier sei noch einmal darauf hingewiesen, dass diese Bedingung in keiner Weise zwingend ist. Für die theoretische Betrachtung wird die Bedingung kleiner eins jedoch als *worst case* angenommen.

Die einzige den Autoren bekannte belastbare Metrik für das Aufstellen eines solchen Verhältnisses sind die Zahlen der nachträglichen Auswertung von Verkehrsunfällen. Für Deutschland sind dies beispielsweise die Zahlen des Statistischen Bundesamtes. Für 2012 gibt das Statistische Bundesamt [21] beispielsweise 3375 polizeilich erfasste Unfälle mit Getöteten in Deutschland an. Dabei wird mit der Zahl für Getötete gearbeitet, da dies den *worst case* für den zu erbringenden Nachweis darstellt. Bezogen auf eine Fahrleistung von 709 Milliarden Kilometern in Deutschland, bedeutet diese Zahl als Durchschnittswert, dass zwischen zwei Unfällen mit Getöteten 210 Millionen Kilometer liegen. Da die Zahlen lediglich einen Erwartungswert darstellen, existieren auch Strecken zwischen zwei Unfällen, die kürzer oder länger sind. Um diese Verteilung der Unfallereignisse darzustellen, wird die Poisson-Verteilung herangezogen:

$$P_{\lambda}(k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}.$$

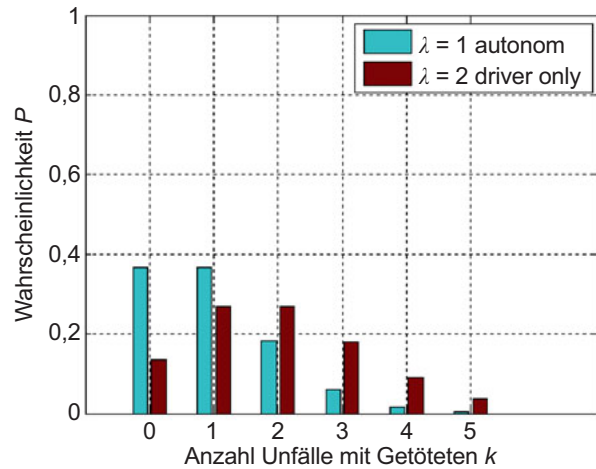
Dabei wird angenommen, dass das Auftreten eines Unfalls ein unabhängiger und nicht erschöpfender Zufallsprozess ist $P_{\lambda}(k)$. In der Gleichung entspricht k der Anzahl an Unfallereignissen und λ dem Erwartungswert, mit dem dieses Ereignis auftritt. Der Erwartungswert λ ist definiert durch den Quotienten

$$\lambda = \frac{s_{test}}{s_{leist}},$$

wobei s_{test} für die beobachteten Testkilometer steht und s_{leist} für die Leistungsfähigkeit des Systems. Die Leistungsfähigkeit steht für die erwartete Anzahl von Kilometern zwischen zwei Unfällen. Die Wahrscheinlichkeitsverteilungen für $k = [1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5]$ und $\lambda = [1 \ 2]$ sind in Abb. 21.7 als Beispiel abgebildet.

Aus der Abbildung ist die Problematik für den Nachweis des Risikos gut zu erkennen: Angenommen, die blaue Verteilung steht für ein autonomes Fahrzeug und die rote Verteilung für ein Driver-Only-Fahrzeug. Beide Fahrzeuge werden die gleiche Anzahl von Testkilometern bewegt $s_{test} = a_s \cdot \bar{s}$, mit dem Streckenfaktor $a_s = 2$ und dem durchschnittlichen Abstand \bar{s} zwischen zwei Unfällen mit Getöteten. Die Leistungsfähigkeit $s_{leist} = a_{leist} \cdot \bar{s}$

Abb. 21.7 Poisson-Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Anzahl von Unfällen mit unterschiedlichen Erwartungswerten



des autonomen Fahrzeugs ist um den Leistungsfaktor $a_{leist} = 2$ größer als die des Driver-Only-Fahrzeugs. Daraus folgt für das autonome Fahrzeug der Erwartungswert $\lambda = 1$ und für das Driver-Only-Fahrzeug $\lambda = 2$.

Obwohl das autonome Fahrzeug gemäß der vorherigen Annahme eine doppelte Leistungsfähigkeit wie das Driver-Only-Fahrzeug auszeichnet, geriet das autonome Fahrzeug während des Tests in einen Unfall mit Getöteten (Wahrscheinlichkeit $P_1(1) = 1 \cdot e^{-1} \approx 0,37$), das Driver-Only-Fahrzeug jedoch nicht (Wahrscheinlichkeit $P_2(0) = 1 \cdot e^{-2} \approx 0,14$). Eine Aussage, dass das autonome Fahrzeug unsicherer sei als das Driver-Only-Fahrzeug, ist dementsprechend infrage zu stellen. Dieses Beispiel zeigt, dass auf jeden Fall ein Streckenfaktor a_s größer zwei notwendig ist, um mit einer ausreichend hohen Signifikanz eine Aussage über die Leistungsfähigkeit des autonomen Fahrens treffen zu können.

Aus wissenschaftlicher Sicht ist beispielsweise von einer fünfprozentigen Irrtumswahrscheinlichkeit auszugehen und somit auch das gleiche Signifikanzniveau $e = 5\%$ heranzuziehen. Der Streckenfaktor a_s ist in Abhängigkeit der Anzahl an Unfällen entsprechend groß zu wählen, sodass die Wahrscheinlichkeit für ein Fahrzeug mit geringerer Leistungsfähigkeit kleiner fünf Prozent wird, diese geringe Anzahl von Unfällen zu erreichen. Abb. 21.8 zeigt das Ergebnis dieser Überlegung und der numerischen Berechnung der Werte.

Der Datenpunkt bei null Unfällen mit Getöteten bedeutet, dass mit einem Streckenfaktor von $a_s \approx 3$ die Wahrscheinlichkeit kleiner fünf Prozent ist, dass ein schlechteres Fahrzeug als die Vergleichsgruppe in keinen Unfall mit Getöteten verwickelt ist.

Unglücklicherweise ist die Erfolgswahrscheinlichkeit für diesen Test genauso gering. Denn ist das Testfahrzeug genauso gut wie die Vergleichsgruppe, also gilt Leistungsfaktor $a_{leist} = 1$, dann folgt daraus eine Erfolgswahrscheinlichkeit für diesen Nachweis von ebenfalls nur fünf Prozent. Damit der Test gelingt, ist eine größere Erfolgswahrscheinlichkeit erstrebenswert. Als Beispiel wird nun eine Erfolgswahrscheinlichkeit von 50 Prozent gefordert, mit der ein Test zeigen soll, dass das Testfahrzeug nicht schlechter als die Ver-

Abb. 21.8 Streckenfaktor bei Signifikanzniveau fünf Prozent

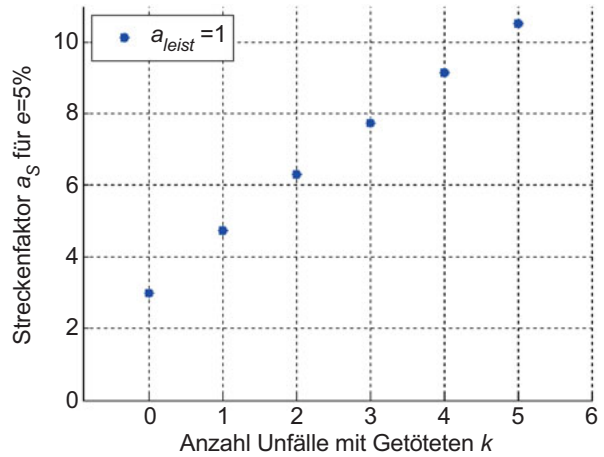
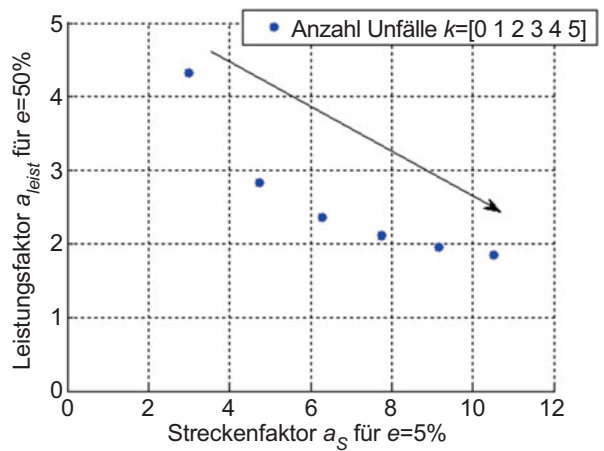


Abb. 21.9 Streckenfaktor über Leistungsfaktor bei einem Signifikanzniveau von fünf Prozent und einer Erfolgswahrscheinlichkeit des Tests von 50 Prozent



gleichsgruppe ist. Dazu muss das Testfahrzeug leistungsstärker sein als die Testgruppe. Abb. 21.9 zeigt das Ergebnis dieser Überlegung.

Der erste Punkt steht für folgende Aussage: Wenn das Testfahrzeug ca. 4,3-mal besser als die Vergleichsgruppe ist, dann gelingt der Test mit 50 Prozent Wahrscheinlichkeit, dass das Testfahrzeug mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von fünf Prozent besser als die Vergleichsgruppe ist.

Was dieses Ergebnis nun für die Testfahrt mit dem autonomen Fahrzeug bedeutet, wird an der Strecke zwischen zwei Unfällen mit Getöteten von 210 Millionen Kilometern demonstriert. Der letzte Punkt in Abb. 21.9 enthält die Aussage: Wenn das autonome Fahrzeug ca. zweimal so gut ist ($a_{leist} \approx 2$) wie das Vergleichssystem (aktuelle Fahrzeuge), dann muss eine Teststrecke von mindestens 2,1 Milliarden Kilometern zurückgelegt werden ($s_{test} = a_s \cdot 210 \text{ Mio km}$). In diesem Fall wurde der Nachweis mit 50-prozentiger Wahrscheinlichkeit erbracht, allerdings wurden auch mit der gleichen Wahrscheinlichkeit fünf Unfälle erfahren.

Aus dieser Überlegung folgt ironischerweise, dass je leichter die Fahrzeugführung ist, desto mehr Testkilometer absolviert werden müssten, da der Vergleichswert entsprechend größer ist. Für den Autobahnpiloten folgt aus den aktuellen Zahlen des Statistischen Bundesamtes ein Vergleichswert von 662 Millionen Kilometern zwischen zwei Unfällen mit Getöteten. Dementsprechend müssten 6,62 Milliarden Testkilometer auf der Autobahn absolviert werden, um den dargestellten Bedingungen zu entsprechen.

Dieser theoretische Exkurs in die Statistik zeigt, dass die Freigabe zur Herausforderung, wenn nicht sogar zur Falle für das autonome Fahren werden kann. Dabei wurden mehrere Faktoren für die Ermittlung der Testkilometer noch nicht adressiert; beispielsweise würde eine Variation des Systems zu einem erneuten Fahren der Testkilometer führen, oder der Test mit und ohne Insassen könnte mit einem Faktor zwei in die Berechnung eingehen. Wie sich die unterschiedlichen, hier nicht betrachteten Parameter wie Einsatzbereich, Unfallfolgentyp, Unfallverursachung und Vergleichsfahrzeuge auf die ermittelten notwendigen Kilometer auswirken, wird in Winner [22] detailliert hergeleitet.

Bei diesen Überlegungen handelt es sich um eine theoretische Betrachtung mit freigelegten Annahmen. Dennoch eignet sich dieser Ansatz, um die Problematik und die Herausforderungen aufzuzeigen sowie die nun folgenden Ansätze zu motivieren.

21.6 Ansätze für das Lösen der Freigabeherausforderung

Wie gezeigt wurde, bildet das autonome Fahren ein neues Testobjekt, das aufgrund seiner Eigenschaften den Einsatz der klassischen Testkonzepte infrage stellt. Das Überwinden der beschriebenen Freigabeherausforderung bedarf neuer Ansätze: Dementsprechend wird im nächsten Unterabschnitt diskutiert, warum aus Sicht der Freigabe das Wiederverwenden von freigegebenen Funktionen und somit ein evolutionärer Ansatz notwendig erscheint. Daran anschließend werden existierende Ansätze diskutiert, die eine Beschleunigung der Freigabe ermöglichen könnten.

21.6.1 Wiederverwenden freigegebener Funktionen

Die erste und einfachste Möglichkeit, eine Freigabe für ein neues System zu erhalten, ist das Wiederverwenden von bereits freigegebenen Funktionen. Wird ein System in gleicher Weise wie zuvor eingesetzt, so kann die bereits erteilte Freigabe übernommen werden. Ein erweiterter Funktionsumfang ist jedoch neu abzusichern; je kleiner dabei der neue Bereich ist, desto geringer wird der Aufwand.

Dieser Argumentation folgend scheint eine Evolution über alle Dimensionen als möglicher Ansatz, um die Freigabeherausforderung zu beherrschen. Mit den Dimensionen ist hier beispielsweise die Geschwindigkeit, der Einsatzbereich, aber auch der Automationsgrad gemeint. Bei der Wahl der Evolutionsschritte können zwei Ansichten unterschieden werden: Aus Sicht eines Funktionsentwicklers ist die Autobahn während

eines Stauszenarios aufgrund der reduzierten Geschwindigkeit und der begrenzt zugänglichen Szenerie ein geeignetes Einstiegszenario. Aus Sicht der zuvor angestellten statistischen Überlegungen wäre ein Einstiegszenario sinnvoll, bei der der Mensch als Vergleichsgruppe möglichst schlecht abschneidet, also möglichst viele Fehler macht. Möglichst viele Fehler bedeutet wenig Strecke, sodass der Nachweis der Leistungsfähigkeit einfacher wird.

Der revolutionäre Schritt – ein autonomes Fahrzeug ohne evolutionäre Zwischenschritte abzusichern – widerspricht diesem Ansatz und scheint unwahrscheinlich.

21.6.2 Beschleunigung der Freigabe

Trotz des evolutionären Ansatzes sind dennoch neue Funktionen abzusichern. Um dies zu beschleunigen, sind prinzipiell zwei Stellschrauben vorhanden: Erstens kann das Was und zweitens das Wie verändert werden. Welche Testfälle sind notwendigerweise zu überprüfen und womit werden diese Tests durchgeführt? Schuldt et al. [10] nennen dies Testfallgenerierung und Testdurchführung.

21.6.2.1 Testfallgenerierung

Die Testfallgenerierung definiert die durchzuführenden Tests: Nach Schuldt et al. [10] folgt aus der Vielzahl von Einflussfaktoren im Einsatzbereich sowie deren Wertebereichen eine unüberschaubare Anzahl von Testfällen. Wie bereits beschrieben, stützen sich Systeme, die aktuell im Einsatz sind, auf die Leistungsfähigkeit des Menschen und dessen Möglichkeit, das Fahrzeug zu kontrollieren. Daraus folgt eine starke Raffung der theoretisch notwendigen Testfälle. Somit existiert eine Metrik, die eine Aussage über die Sicherheit ermöglicht, ohne sämtliche Situationen zu testen. Diese Raffung entfällt für das autonome Fahrzeug, sodass neue Wege gesucht werden, die Anzahl von Testfällen für das autonome Fahrzeug zu reduzieren. Dabei sind während der Testfallgenerierung die Anforderungen an ein Testkonzept aus Abschn. 21.3 zu beachten. Besonders die Repräsentativität ist gefährdet, wenn Testfälle gestrichen werden.

Die Ansätze von Glauner [23] und Eckstein [24] beschreiben dafür das Identifizieren von relevanten bzw. kritischen Situationen im öffentlichen Straßenverkehr: Basierend auf zuvor definierten Ereignisklassen werden während der Testfahrten oder groß angelegter Feldstudien potenziell kritische Situationen identifiziert. Diese kritischen Situationen fließen in die Testfallgenerierung ein, sodass Situationen geringer Kritikalität gestrichen werden können. Dieser Raffung liegt die Annahme zugrunde, dass Situationen, die weniger kritisch sind, durch kritische Situationen abgedeckt werden. Dabei bleibt aktuell als unge löste Aufgabe die Suche nach einem validen Risikomaß, das im ersten Schritt eine Bewertung und im zweiten Schritt die Auswahl von kritischen Situationen ermöglicht.

Ein anderes Vorgehen zur Raffung von Testfällen bieten Schuldt et al. [10]: Vorgeschlagen wird eine generische Testfallgenerierung, bei der Verfahren des Black-Box-Testings und der Kombinatorik eingesetzt werden, um die Einflussfaktoren auf die vom System ausgehende

Sicherheit möglichst ausreichend abzudecken und gleichzeitig redundanzarm und effizient zu sein. Dieser Ansatz basiert auf statistischen Betrachtungen ohne Wissen und Erfahrung über das Testobjekt, hat aber dennoch das Potenzial, die notwendigen Testfälle zu reduzieren.

Der Ansatz beschrieben von Tatar und Mauss [25] ist ebenfalls für Black-Box-Testing geeignet: Zur Generierung von Testfällen wird eine Optimierung eingesetzt. Dabei werden die Eingangsgrößen einer X-in-the-Loop (XiL)-Simulation so variiert, dass die zu definierende Bewertungsfunktion des Tests optimiert wird. Trotz der Herausforderung der validen XiL-Simulation und der benötigten Bewertungsfunktion liefert dieser Ansatz die Möglichkeit, die Testfälle auf die als relevant bewerteten zu fokussieren.

Ein vierter theoretischer Ansatz ist der Einsatz und der Test eines Sicherheitskonzepts mithilfe von formalen Methoden [26]. Ähnlich wie für den Menschen als Überwacher und Teil des Sicherheitskonzepts von aktuellen Fahrzeugen angenommen, könnte ein nachgewiesenes sicheres Sicherheitskonzept den Test der Gesamtfunktionalität des Fahrzeugs in der vollständigen Repräsentativität überflüssig machen. Somit wäre eine Raffung der Testfälle möglich.

21.6.2.2 Testdurchführung/Testwerkzeug

Neben der Möglichkeit, während der Testfallgenerierung die Testfälle zu raffern, besitzt die Testdurchführung ebenfalls Potenzial, die Freigabe zu beschleunigen. Wird jedoch von der Realfahrt abgewichen und ein anderes Testwerkzeug für die Testdurchführung gewählt, geht damit immer eine Vereinfachung einher. Dies wird anhand von Abb. 21.10 genauer beschrieben.

Abb. 21.10 unterteilt die Testwerkzeuge in neun Klassen, die sich danach unterscheiden, wie das Fahrzeug bzw. das Umfeld dargestellt werden. Der Insasse wird bei dieser Darstellung dem Fahrzeug zugeordnet, da er sich im Fahrzeug befindet und nicht aktiv in die autonome Fahrt eingreift.

Die Realfahrt bildet sowohl Umfeld als auch Fahrzeug real ab. Dementsprechend besteht während dieser Tests die Gefahr von realen Unfällen und deren Auswirkungen. Das Umfeld ist nicht kontrolliert, sodass Testsituationen basierend auf dem Zufall der Realität entstehen; dementsprechend ist die Reproduzierbarkeit für komplexe Situationen mit anderen Verkehrsteilnehmern nicht gegeben. Dieses Testwerkzeug kann frühestens mit ersten straßentauglichen Prototypen eingesetzt werden und erfolgt somit am Ende des Entwicklungsprozesses.

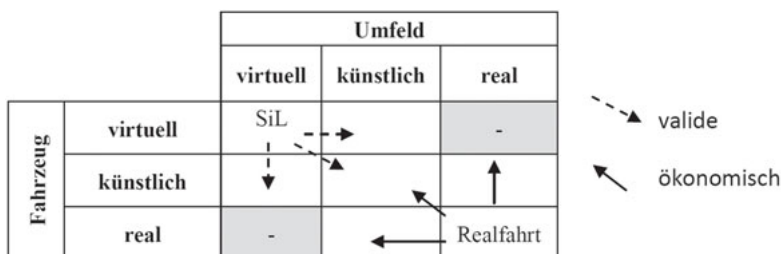


Abb. 21.10 Einteilung von Testwerkzeugen für den Test von autonomen Fahrzeugen

Eine Alternative ist das Testen von realen Fahrzeugen in einem künstlichen Umfeld: Dies entspricht der Fahrt auf einem Testfeld, denn dort sind zum einen Situationen künstlich hergestellt und zum anderen besitzen die „Verkehrsteilnehmer“ das Bewusstsein, sich in einem Test zu befinden. Zugunsten der Sicherheit, Variierbarkeit, Beobachtbarkeit sowie der Reproduzierbarkeit wird die Realität vereinfacht. Aus ökonomischen Gesichtspunkten werden zwar Testfälle gezielt getestet und müssen nicht wie in Realfahrten per Zufall erfahren werden, jedoch bedarf der Aufbau des Testfelds zusätzliche zeitliche wie finanzielle Mittel.

Des Weiteren könnte sich ein künstliches Fahrzeug in einem realen Umfeld bewegen; künstlich bezieht sich in diesem Fall beispielsweise auf die Ausstattung des autonomen Fahrzeugs mit einem Überwacher, der die Möglichkeit hat, in die Fahraufgabe einzugreifen. Dies kann zum einen ein Testfahrer mit Lenkrad und Pedalerie sein oder aber ein technisches System, das aufgrund von leistungsfähigerer (Zusatz-)Sensorik dem Seriensystem überlegen ist. Werden Komponenten künstlich dargestellt, leidet darunter die Realitätsnähe, jedoch wird an Sicherheit, Reproduzierbarkeit und Beobachtbarkeit gewonnen.

Neben der Möglichkeit, Umfeld und Fahrzeug künstlich zu gestalten, existieren Werkzeuge, die sich einer virtuellen Repräsentation in Form von Computersimulationen bedienen. Dabei sind die zwei Felder, die real und virtuell kombinieren, grau hinterlegt, da diese streng genommen nicht existieren, denn Sensoren und Steller haben genau die Aufgabe der Wandlung zwischen virtuellen und realen Signalen. Ein realer Radarsensor kann kein virtuelles Umfeld sensieren, und ein virtueller Wechselrichter kann keine reale Spannung erzeugen.

Was jedoch möglich ist, sind Kombinationen aus künstlichem und virtuellem Umfeld bzw. Fahrzeug: Als Beispiel dafür existieren unterschiedliche Konzepte von Vehicle-in-the-Loop (ViL). Um den Kreis aus Aktionen und Reaktionen von Umfeld und Fahrzeug zu schließen, werden reale Komponenten in der Simulation in Form von Modellen abgebildet. Dabei werden entweder die angesprochenen Sensoren bzw. Steller stimuliert, also künstlich angeregt; Beispiele hierfür sind simulationsbasierte Videos als Stimulanz für Kamerasysteme oder Rollenprüfstände als Stimulanz für Antriebssteller. Oder die Testwerkzeuge simulieren direkt die Leistungssignale wie z. B. die elektromagnetische Welle und versuchen, reale Effekte von Sensoren und Stellern in der Simulation mithilfe von Modellen darzustellen. Für weitere Informationen dazu s. Bock [27] oder Hendricks [28]. Der beschriebene Einsatz von Modellen stellt die Aussagekraft dieser Testwerkzeuge infrage. Um valide Aussagen mithilfe solcher Modelle zu erhalten, ist der Nachweis zu erbringen, dass diese Modelle keine unzulässigen Vereinfachungen beinhalten; „unzulässig“ ist hier im Kontext der Funktion zu sehen und bedeutet, dass Abweichungen von der Realität nur unterhalb der Toleranzen der Funktion zulässig sind. Wenn jedoch diese Validität nachgewiesen wurde, erlaubt das Testwerkzeug eine größere Sicherheit bei der Testdurchführung, da sich Teile des Umfelds und das Fahrzeug nur noch in der virtuellen Welt begegnen. Aufgrund der virtuellen Komponenten sind diese Testwerkzeuge von einer größeren Variierbarkeit, Beobachtbarkeit und Reproduzierbarkeit gekennzeichnet. Aus ökonomischer Sicht besitzt dieses Testwerkzeug den Vorteil, das virtuelle Umfeld einfach zu variieren

oder aber das Fahrzeug in unterschiedlichsten Varianten darzustellen. Von ökonomischem Nachteil könnte sich die Validierung der Modelle erweisen (vgl. Herausforderung bei SiL). Ein Vorteil dieses Testwerkzeugs ist die Möglichkeit, basierend auf dem simulierten Fahrzeug, bereits frühzeitig in der Entwicklung Tests durchzuführen.

Die letzte Stufe der Abstraktion repräsentiert die Kombination eines virtuellen Fahrzeugs und des virtuellen Umfelds: Das mit Software-in-the-Loop (SiL) bezeichnete Testwerkzeug stellt dabei den geschlossenen Regelkreis durch die Modellierung relevanter Komponenten in der Simulation dar. Anders als bei den Testwerkzeugen zuvor, ist die gesamte Testwelt virtuell. Die Tests sind sicher, variiert, beobachtbar und reproduzierbar; außerdem besteht die Möglichkeit, dieses Werkzeug bereits frühzeitig in der Entwicklung einzusetzen. Den ökonomischen Vorteil bildet die Hardware-Unabhängigkeit, denn somit ist keine Verknüpfung an die Echtzeit mehr vorhanden. Die Ausführung der Tests wird rein durch Rechenleistung begrenzt; Simulationen können Tag und Nacht sowie massiv parallel erfolgen. Demgegenüber steht die Realitätsnähe der virtuellen Testwelt und somit jedes einzelnen Modells: Nur wenn die Validität der eingesetzten Modelle nachgewiesen wurde, besitzen virtuelle Tests die Aussagekraft für eine Freigabe. Dementsprechend muss für die ökonomische Betrachtung von simulationsbasierten Verfahren vor allem die Validierung der Modelle betrachtet werden.

Die gleiche Herausforderung existiert für den Einsatz von formalen Methoden. Mitsch schreibt diesbezüglich: “We do ... prove that collisions can never occur (as long as the robot system fits to the model).” [26] Das bedeutet, auch für formale Methoden bedingt der Realitätsgrad der eingesetzten Modelle die Aussagekraft der Ergebnisse. Eine besondere Herausforderung und somit im Fokus der Forschung steht beispielsweise die Formalisierung der Unsicherheiten von Sensoren oder der Eigenschaft von weiteren Verkehrsteilnehmern.

Die Diskussion der Testwerkzeuge zeigt das Potenzial, die Freigabe zu beschleunigen: Mithilfe von künstlich erzeugtem Umfeld und Fahrzeug können Testfälle gezielt aufgebaut und angefahren werden. Zusätzlich ermöglicht der virtuelle Ansatz, die Tests abhängig von der eingesetzten Rechenleistung zu beschleunigen und zu parallelisieren.

Die Diskussion zeigt aber auch, dass die Validität und somit die Aussagekraft der Tests mit Einführung von künstlichen und virtuellen Komponenten zur Herausforderung wird.

21.7 Fazit

Das autonome Fahren unterscheidet sich besonders durch den Wegfall des menschlichen Überwachers von assistierten oder teilautomatisierten Systemen und dessen Fähigkeiten zur Korrektur dieser Systeme. Die Metrik, bestehend aus Realfahrt und Fahrerlaubnistest, die eine Aussage über die Sicherheit aktuell in Serien befindlicher Automatisierungsgrade ermöglicht, ist für das autonome Fahren nicht mehr gültig. Der daraus folgende Wegfall der Raffung von Testfällen führt dazu, dass aktuelle Testkonzepte nicht geeignet sind, um das neue System des autonomen Fahrens abzusichern. Das Festhalten an aktuellen Testkonzepten würde zu einem ökonomisch nicht vertretbaren Aufwand führen und zur Frei-

gabefälle für das autonome Fahren werden. Die Autoren sehen jedoch drei Ansätze, diese Freigabefälle zu umgehen:

Erstens erscheint der evolutionäre Ansatz oder alternativ die Transformation (s. Kap. 10) als notwendig, denn nur die schrittweise Einführung entlang der unterschiedlichen Dimensionen Geschwindigkeit, Szenerie und Automationsgrad ermöglicht das Übernehmen von abgesicherten Komponenten und reduziert den Aufgabenumfang der folgenden Freigaben. Zweitens sind die notwendigen Testfälle, basierend auf Felderfahrung und statistischen Verfahren zu raffen. Die Herausforderung ist dabei die Metrik, die eine Aussage über die Sicherheit des Systems in Abhängigkeit der absolvierten Testfälle ermöglicht. Drittens sind alternative Testwerkzeuge neben der Realfahrt einzusetzen. Dabei wird erwartet, dass auf Realfahrten nicht vollständig verzichtet werden kann, denn die Verlagerung von Testfällen in ViL, SiL bzw. in Verfahren des formalen Beweises von Sicherheit bedarf den Nachweis der Validität.

Abschließend ist zu sagen, dass die vorgestellten Herausforderungen nicht ausschließlich intern durch die Automobilindustrie gelöst werden sollten. Auch wenn Testkonzepte für das autonome Fahren optimiert werden, wird es die 100-prozentige Sicherheit nicht geben. Die „Vision Zero“ bleibt besonders im Mischbetrieb mit zusätzlichen Verkehrsteilnehmern zunächst eine Vision. Spätestens mit dem ersten Unfall, den ein autonomes Fahrzeug verursacht, wird die zuvor erteilte Freigabe auf den Prüfstand gestellt. Dementsprechend sollte die Grundlage für die Freigabe durch die Beteiligten öffentlich diskutiert und transparent gestaltet werden.

Literatur

1. Felkai, R., Beiderwieden, A.: Schaffen allgemeiner Voraussetzungen der Projektabwicklung. In: Projektmanagement für technische Projekte, pp. 7–49. Springer Fachmedien Wiesbaden (2013)
2. Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union: Richtlinie 2007/46/EG (2007)
3. Reuter, A.: Produkthaftung in Deutschland. In: Werdich, M. (ed.) FMEA – Einführung und Moderation, pp. 121–137. Vieweg+Teubner Verlag (2012)
4. 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)
5. Ward, R.B.: Revisiting Heinrich’s law. In: Chemeca. Quality of life through chemical engineering (2012)
6. Hydén, C.: The development of a method for traffic safety evaluation: The Swedish traffic conflicts technique, Lund Institute of Technology. Department of Traffic Planning and Engineering (1987)
7. Donner, E., Winkle, T., Walz, R., Schwarz, J.: RESPONSE 3 – Code of Practice für die Entwicklung, Validierung und Markteinführung von Fahrerassistenzsystemen. In: VDA Technischer Kongress 2007, pp. 231–241, Sindelfingen (2007)

8. Spanfelner, B., Richter, D., Ebel, S., Wilhelm, U., Branz, W., Patz, C.: Herausforderungen in der Anwendung der ISO26262 für Fahrerassistenzsysteme. Challenges in applying the ISO 26262 for driver assistance systems. In: Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, TU München (ed.) 5. Tagung Fahrerassistenz, München (2012)
9. Weitzel, A., Winner, H., Peng, C., Geyer, S., Lotz, F., Sefati, M.: Absicherungsstrategien für Fahrerassistenzsysteme mit Umfeldwahrnehmung, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen – Fahrzeugtechnik (F), vol. 98. Wirtschaftsverl. NW Verl. für neue Wissenschaft, Bremerhaven (2014)
10. Schuldt, F., Saust, F., Lichte, B., Maurer, M., Scholz, S.: Effiziente systematische Testgenerierung für Fahrerassistenzsysteme in virtuellen Umgebungen. In: AAET 2013
11. Horstmann, M.: Verflechtung von Test und Entwurf für eine verlässliche Entwicklung eingebetteter Systeme im Automobilbereich, TU Braunschweig (2005)
12. Daimler AG: Mercedes-Benz präsentiert in Genf Limousine und Coupé der neuen E-Klasse (2009)
13. Fach, M., Baumann, F., Breuer, J., May, A.: Bewertung der Beherrschbarkeit von Aktiven Sicherheits- und Fahrerassistenzsystemen an den Funktionsgrenzen. In: 26. VDI/VW-Gemeinschaftstagung Fahrerassistenz und Integrierte Sicherheit, 6./7. Oktober 2010 in Wolfsburg (2010)
14. Burgdorf, F.: Eine kunden- und lebenszyklusorientierte Produktfamilienabsicherung für die Automobilindustrie, KIT Scientific Publishing; Karlsruher Institut für Technologie (2010)
15. Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE): Regelung Nr. 13-H – Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von Personenkraftwagen hinsichtlich der Bremsen (2010)
16. Baake, U., Wüst, K., Maurer, M., Lutz, A.: Testing and simulation-based validation of ESP systems for vans. *ATZ Worldw* 116(2), 30–35 (2014). doi: 10.1007/s38311-014-0021-6
17. Rasmussen, J.: Skills, Rules, and Knowledge; Signals, Signs, and Symbols, and Other Distinctions in Human Performance Models. *IEEE Transactions On Systems, Man, and Cybernetics SMC-13*(3), 257–266 (1983)
18. Donges, E.: Fahrerverhaltensmodelle. In: Winner, Hakuli, Wolf (eds.) *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, pp. 15–23 (2011)
19. Ständer, T.: Eine modellbasierte Methode zur Objektivierung der Risikoanalyse nach ISO 26262, TU Braunschweig (2011)
20. Bahr, M., Sturzbecher, D.: Bewertungsgrundlagen zur Beurteilung der Fahrbefähigung bei der praktischen Fahrerlaubnisprüfung. In: Winner, H., Bruder, R. (eds.) 6. Darmstädter Kolloquium Mensch+Fahrzeug: Maßstäbe des sicheren Fahrens. *Ergonomia* (2013)
21. Statistisches Bundesamt (Destatis): Verkehrsunfälle – Fachserie 8 Reihe 7 (2012)
22. Winner, H.: Quo vadis, FAS? In: Winner, H., Hakuli, S., Lotz, F., Singer, C. (eds.) *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, 3rd edn. Vieweg-Teubner-Verlag (2015)
23. Glauner, P., Blumenstock, A., Hauéis, M.: Effiziente Felderprobung von Fahrerassistenzsystemen. In: UNI DAS e.V (ed.) 8. Workshop Fahrerassistenzsysteme, pp. 5–14, Walting (2012)
24. Eckstein, L., Zlocki, A.: Safety Potential of ADAS – Combined Methods for an Effective Evaluation. *ESV* (2013)
25. Tatar, M., Mauss, J.: Systematic Test and Validation of Complex Embedded Systems. *ERTS-2014*, Toulouse, 5–7 (2014)
26. Mitsch, S., Ghorbal, K., Platzer, A.: On Provably Safe Obstacle Avoidance for Autonomous Robotic Ground Vehicles. *Robotics Science and Systems (RSS)*, 2013. Accessed 27 June 2014
27. Bock, T.: Bewertung von Fahrerassistenzsystemen mittels der Vehicle in the Loop-Simulation. In: Winner, H., Hakuli, S., Wolf, G. (eds.) *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, pp. 76–83. Vieweg+Teubner Verlag (2012)
28. Hendriks, F., Tideman, M., Pelders, R., Bours, R., Liu, X. (eds.): Development tools for active safety systems: Prescan and VehIL. *Vehicular Electronics and Safety (ICVES)*, 2010 IEEE International Conference on (2010)

Walther Wachenfeld, Hermann Winner

Inhaltsverzeichnis

22.1 Einleitung	466
22.2 Fahrzeug, Umwelt und lernender Fahrer	466
22.3 Lernende technische Systeme	468
22.3.1 Verschiedene Verfahren des Maschinellen Lernens	469
22.3.2 Beispiele	471
22.4 Die Automation, die den lernenden Fahrer ersetzt	472
22.4.1 Sicherheitsrelevante Systeme	473
22.4.2 Herausforderungen und Lösungsansätze in den verschiedenen Phasen des Systemlebenszyklus	474
22.4.3 Maße sicheren Fahrens	479
22.5 Die Automation als Teil eines lernenden Kollektivs	483
22.6 Fazit	484
Literatur	486

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

22.1 Einleitung

Mit dem autonomen Fahren wird ein technisches System den Menschen als Fahrer des Automobils ersetzen. Aktuell arbeiten die Automobilindustrie, Universitäten, aber auch große IT-Unternehmen an der Implementierung von Funktionen, die dem technischen System erlauben, die Fahrzeugführung umzusetzen. Dabei stehen die Aufgaben der Perception, Kognition, Verhaltensentscheidung und die Verhaltensaussführung, die auch der Mensch vollbringt, im Fokus. Zusätzlich besitzt der Mensch weitere Fähigkeiten, die nicht direkt mit dem Führen eines Fahrzeugs in Verbindung stehen. Beispielsweise verändert das Lernen des Menschen direkt die Leistungsfähigkeit, mit der er Aufgaben bewältigt. Diese Fähigkeit des Menschen im System Fahrer – Fahrzeug – Umwelt eröffnet die Frage, ob für das Ersetzen des Menschen das technische System ebenfalls Lernfunktionen aufweisen wird. In den verschiedensten Bereichen, getrieben vor allem durch die Informatik, existieren lernende und gelernte Systeme unterschiedlichster Form, die es mit herkömmlichen analytischen Systemen und deren Leistungsfähigkeit aufnehmen können. Das Besondere der Fahrzeugautomatisierung ist jedoch zum einen deren Sicherheitsrelevanz, zum anderen unterscheidet sich das Produkt Automobil zusätzlich durch seine Systemlebenszyklen von anderen Gütern aus der IT-Industrie. Diese beiden Besonderheiten mit ihren Herausforderungen und Lösungsansätzen werden diskutiert. Zusätzlich wird auf kollektives Lernen im Zusammenhang des autonomen Fahrens eingegangen, denn besonders der direkte Austausch bzw. die Kopie von Gelerntem stellt einen der Vorteile des maschinellen Lernens gegenüber dem menschlichen Lernprozess dar.

Das Nachbilden des menschlichen Lernens durch Maschinelles Lernen beschäftigt eine ganze Forschergemeinde, denn sowohl über die Prozesse des menschlichen Lernens als auch für Methoden des Maschinellen Lernens wird daraus ein weiterführendes Verständnis als Ergebnis erwartet. Mit dem Bewusstsein über den aktuell vorhandenen Unterschied zwischen beiden Formen des Lernens wird in diesem Kapitel Maschinelles Lernen als Algorithmus verstanden, der durch einen Menschen erzeugt wird. Die Ausführung der Software folgt diesen Algorithmen wie jede andere Software auch. Ziel dieses Beitrags ist es nicht, den lernenden Menschen mit einem lernenden Fahrroboter zu vergleichen. Vielmehr wird diskutiert, warum, ob und mit welchen Herausforderungen und Lösungsansätzen Maschinelles Lernen in seiner aktuellen Form im autonomen Fahrzeug denkbar ist. Dabei stellt dieses Kapitel im Besonderen die Sicht der Fahrzeugtechnik auf diese Frage dar und basiert für den Bereich des Maschinellen Lernens auf Erfahrungen aus der Literatur.

22.2 Fahrzeug, Umwelt und lernender Fahrer

Führt der Fahrer ein Fahrzeug in einer beliebigen Umwelt, handelt es sich dabei um eine zielgerichtete Tätigkeit. Nach Rasmussen [1, 2] zeigt der Mensch dabei ein Verhalten, das sich in drei Bereiche aufteilen lässt. Er handelt fertigkeit-, regel- und wissensbasiert (s. Abb. 21.6 in Kap. 21). Fertigkeitbasiertes Verhalten wird von Rasmussen [1] als Reiz-

Reaktions-Automatismus beschrieben, den der Mensch in alltäglichen Routinesituationen ohne intensive Inanspruchnahme von kognitiven Fähigkeiten bewältigt.

Kognitiv anspruchsvoller gestaltet sich das regelbasierte Verhalten. Zusätzlich zur Wahrnehmung und zur motorischen Aktion ist für das regelbasierte Verhalten eine assoziative Zuordnung notwendig. Hierbei ordnet der Mensch die erkannte Situation einer ihm bekannten Regel zu und wählt basierend darauf aus einem Repertoire an Verhaltensregeln. Diese Regeln hat der Mensch zielgerichtet gelernt oder sich von vergangenen Situationen und Handlungen gemerkt („gespeichert“). In diesem Zusammenhang besitzt der Mensch die Fähigkeit, ähnliche Situationen zu identifizieren und somit gelernte Regeln auf ähnliche Situationen zu übertragen.

Treten Situationen auf, die für den Menschen neu sind und für die keine trainierten Handlungen vorliegen, agiert der Mensch wissensbasiert. Dazu versucht der Mensch, basierend auf seinem trainierten Wissen, die Handlungsalternativen, die zur Auswahl stehen, zu generieren und zu bewerten. Die subjektiv optimale Alternative wird ausgewählt und ausgeführt.

Rasmussens [1] Verständnis von zielgerichtetem Handeln macht deutlich, was mit dem lernenden Fahrer gemeint ist. Zu Beginn der Fahrer-„Karriere“ wird in der Theorieausbildung der Fahrschule das Grundlagenwissen über den Straßenverkehr aufgebaut und abgeprüft. Dabei setzt dieses Wissen auf dem bereits erworbenen Wissen durch das Leben in der Gesellschaft auf. Zusätzlich wird regelbasiertes Verhalten durch Theorie- und Praxisunterricht trainiert. Mit abgelegter Führerscheinprüfung darf der Mensch nun ohne weitere Unterstützung am öffentlichen Straßenverkehr teilnehmen (Ausnahme: begleitendes Fahren beim Führerschein mit 17). Jedoch hat der Mensch zu diesem Zeitpunkt weder alle Regeln erlernt noch das Wissen erarbeitet, das für das zukünftige Leben im öffentlichen Straßenverkehr benötigt wird. Mit jeder Erfahrung, die Menschen sammeln, verschiebt sich das Verhalten von wissensbasiert zu regelbasiert und von regelbasiert zu fertigkeitbasiert. Das Training ermöglicht somit eine Effizienzsteigerung des menschlichen Verhaltens [1].

Zieht man Zahlen für verunglückte Pkw-Fahrer pro einer Million Kilometer Verkehrsleistung heran, dann sinkt nach Oswald und Williams [3, 4] das Risiko mit dem fortschreitenden menschlichen Alter, bis es ab 40–50 wieder zu steigen beginnt. Nach Burgard [5] sind dafür neben charakterlichen Kompetenzen (Persönlichkeit) sowie psychischen und physischen Voraussetzungen auch die Erfahrungen verantwortlich, die aus dem Alter folgen. Wird das Verarbeiten der Erfahrungen als Lernprozess gesehen, trägt die Fähigkeit des Lernens zu einer Verbesserung der Fahrkompetenz bei [6].

Würde der Straßenverkehr klaren Regeln folgen, die dem Menschen bekannt sind, so müsste er das oben beschriebene Verhalten nicht zeigen. Es handelt sich beim Straßenverkehr jedoch um ein offenes System, bestehend aus statischen und dynamischen Objekten sowie einer Vielzahl von Umfeldeinflüssen, wie beispielsweise Helligkeit oder Niederschlag. Wenn auch in geringerem Umfang, verglichen mit Fahranfänger/innen, treten dadurch für erfahrene Teilnehmer des Straßenverkehrs weiterhin unbekannte Situationen auf, die es zu bewältigen gilt. Weil der Mensch eben dieses wissens-, regel- und fertigkeit-

basierte Verhalten zeigt, ist der aktuelle Straßenverkehr mit der vorhandenen Effizienz, Genauigkeit und Sicherheit möglich.

Zusätzlich führt dieses Verhalten zu einem individuellen Fahrverhalten. In ein und derselben Situation handeln Fahrer unterschiedlich und haben verschiedene Vorlieben für die Wahl des Abstands, der Geschwindigkeit und der Beschleunigungen.

Eben diese Fähigkeiten, die das fertigkeit-, regel- und wissensbasierte Verhalten ermöglichen, werden mit der Automatisierung aus der Fahrzeugführung genommen und durch entsprechende Fähigkeiten des Fahrroboters ersetzt.

22.3 Lernende technische Systeme

Der Begriff des Maschinellen Lernens steht für ein Forschungsgebiet, das sich mit Methoden für die Erstellung von Algorithmen beschäftigt. Eine besondere Eigenschaft dieser Algorithmen ist die automatische, auf Erfahrungen basierende Verbesserung des technischen Systems. Die automatische Verbesserung folgt dabei den Regeln und Maßen, die der menschliche Entwickler zuvor definiert hat. Kontrovers diskutierte Vorstellungen von vollkommen frei und kreativ handelnden Maschinen, wenn es diese überhaupt geben wird, sind nicht im Fokus dieser Betrachtung. Für den Einsatz des Maschinellen Lernens wird eine klar definierte Aufgabe benötigt, für die eine Bewertungsmetrik sowie (Trainings-)Daten zur Verfügung stehen.

Ein oft verwendetes Zitat für die Definition von Maschinellern Lernen stammt von Mitchell:

A computer program is said to learn from experience E with respect to some class of tasks T and performance measure P , if its performance at tasks in T , as measured by P , improves with experience E . [7]

Nach Mitchell [7] hat sich Maschinelles Lernen im Einsatz besonders dann bewährt, wenn

1. eine große Anzahl von Daten in einer Datenbank existiert und diese möglicherweise implizit Informationen enthält, die automatisiert extrahiert werden können,
2. Menschen über einen gewissen Bereich nur ein schlechtes Verständnis besitzen und somit das Wissen für effektive Algorithmen fehlt oder
3. Aufgaben eine dynamische Anpassung an sich ändernde Umgebungsbedingungen erfordern.

Wie diese Definition und die Einsatzbereiche zum autonomen Fahren passen, wird in Abschn. 22.4 diskutiert. Zunächst wird jedoch ein Einblick in Verfahren des Maschinellen Lernens gegeben. Mithilfe von Beispielen aus verschiedenen Bereichen wird die Breite der Einsatzmöglichkeiten demonstriert, bevor auf das autonome Fahren als besondere Aufgabe eingegangen wird.

22.3.1 Verschiedene Verfahren des Maschinellen Lernens

Breiman stellte 2001 Folgendes fest:

In the past fifteen years, the growth in algorithmic modeling applications and methodology has been rapid. It has occurred largely outside statistics in a new community – often called machine learning. [8]

In [9] werden die ersten Arbeiten des Maschinellen Lernens u. a. auf McCulloch und Pitts im Jahr 1948 zurückgeführt, sodass die Vielzahl der vorhandenen Lernverfahren eine detaillierte Beschreibung aller Verfahren nicht ermöglicht. Deshalb werden nachfolgend Kategorien von Lernproblemen, nach denen die Verfahren zumeist eingeteilt werden [10, 11, 12], beschrieben.

Supervised Learning

Supervised Learning, überwachtes Lernen oder Lernen mit Lehrer zeichnet sich durch bereits bewertete Trainingsdaten (labeled data) aus. Die Trainingsdaten, also die Erfahrungen, auf denen das Maschinelle Lernen aufbaut, enthalten Eingangs- und Ausgangsgrößen eines Lernproblems. Beispielsweise würden bei der Klassifikation, ob bei einem Unfall Airbags auslösen oder nicht, Trainingsdaten auf der einen Seite aus Beschleunigungswerten und auf der anderen Seite aus zugehörigen Bewertungen (auslösen oder nicht auslösen) bestehen. Diese Bewertungen müssen dabei beispielsweise durch einen Experten/Lehrer oder eine Beobachtung über der Zeit erstellt werden. Das Lernverfahren nutzt nun diese Erfahrungswerte, um für neu beobachtete Eingangswerte die Ausgangsgröße zu bestimmen. Für das Übertragen von Erfahrungswerten auf neue Eingangswerte wird nach [10] zwischen dem *faulen* (lazy- bzw. memory-based learning) und dem *eifrigen* Lernen (eager bzw. model-based learning) unterschieden.

Beim faulen Lernen werden die Trainingsdaten während des Lernens abgespeichert und ein Ähnlichkeitsmaß definiert. Dieses Ähnlichkeitsmaß kann unterschiedlich komplex sein und reicht vom einfachen euklidischen Abstand bis zu komplexen Abständen beim Case-Based-Reasoning. Wenn der Ausgangswert für neue Eingangswerte gesucht wird, werden die dem neuen Fall ähnlichsten Trainingsdaten bestimmt und daraus der Ausgangswert abgeleitet. Dieses Vorgehen entspricht dem transduktiven Schlussfolgern [13]. Im Gegensatz dazu wird beim eifrigen Lernen, basierend auf den Trainingsdaten, während der Trainingsphase ein globales Modell erstellt (Induktion). Ausgangswerte für neue Fälle werden per Deduktion aus dem Modell geschlossen.

Unsupervised Learning

Für das Unsupervised Learning, unüberwachtes Lernen oder Lernen ohne Lehrer stehen ebenfalls Trainingsdaten zur Verfügung, jedoch in diesem Fall ohne Bewertung bzw. Ausgangsgröße (unlabeled data). Bei diesem Lernverfahren ist das Ziel, eine Struktur in den Daten zu finden bzw. diese anhand der Struktur zu klassifizieren. Die Trainingsdaten wer-

den dabei genutzt, um diese Strukturen aufzudecken und neu beobachtete Eingangswerte basierend darauf einzuteilen.

Reinforcement Learning

Das Reinforcement Learning oder Lernen durch Verstärkung unterscheidet sich von beiden vorherigen Verfahren, denn zu Beginn liegen keine oder wenige Trainingsdaten vor. Die für eine angestrebte Verbesserung benötigten Trainingsdaten erzeugt ein Agent¹ selbst, indem nach einem festgelegten Schema die zu optimierende Aufgabe ausgeführt wird. Eine Bewertung der Ausführung der Aufgabe fließt in den Lernprozess zurück und bildet so einen Trainingsdatensatz aus Ein- und Ausgangsgrößen, die für weitere Optimierungsschritte genutzt werden. Die Ansätze des Reinforcement Learnings sind dem sogenannten Innovationsdilemma ausgesetzt, denn „Exploration“ und „Exploitation“ widersprechen einander, was March folgendermaßen beschreibt:

Exploration includes things captured by terms such as search, variation, risk taking, experimentation, play, flexibility, discovery, innovation. Exploitation includes such things as refinement, choice, production, efficiency, selection, implementation, execution. [15]

Dem Lernproblem entsprechend ist ein Gleichgewicht für beides zu finden, denn auf der einen Seite ist in einem teils unbekanntem Suchraum eine optimale Ausführung der Aufgabe gesucht und auf der anderen Seite wird diese Suche durch Rahmenbedingungen wie Kosten, Sicherheit und Zeit begrenzt.

Neben der Frage, ob und in welcher Form die Trainingsdaten vorhanden sind, kann das Lernproblem auch anhand des Einsatzes der Trainingsdaten unterschieden werden.

Batch Learning

Beim Batch oder Offline Learning wird zu einem Zeitpunkt ein Satz von Trainingsdaten verwendet, um die Lernmethode anzuwenden. Erstellt die Lernmethode beispielsweise ein Modell, wird dieses Modell durch weitere Erfahrungen, die während des Einsatzes gesammelt werden, nicht aktualisiert.

Online Learning

Das Online Learning zeichnet sich durch einen iterativen Prozess aus, bei dem neue Erfahrungen in den Lernprozess mit einfließen. Das Ziel ist, die Bewältigung der Aufgabe kontinuierlich zu optimieren und dabei Erfahrungen aus dem Einsatz zu berücksichtigen. Das hat ein Systemverhalten zur Folge, das sich über den Erfahrungen ändert. Da die Erfahrungen in einer zeitlichen Abfolge gesammelt werden, ändert sich das Systemverhalten demzufolge auch über der Zeit.

¹ Russell definiert: “An agent is anything that can be viewed as perceiving its environment through sensors and acting upon that environment through effectors.” [14]

Diese unterschiedlichen Arten von Lernproblemen erfordern den Einsatz verschiedener Methoden des Maschinellen Lernens [12]. Diese reichen von Entscheidungsbäumen, künstlichen Neuronalen Netzen und Genetischen Algorithmen über Stützvektorenmethode, Instanzenbasiertes Lernen, Hidden-Markov-Modelle, Wert-Iteration bis hin zum Q-Lernen usw. Diesen Methoden ist gemein, dass die Güte, mit der ein Lernproblem bearbeitet wird, von drei grundlegenden Eigenschaften abhängt. Zum einen wird die Repräsentativität der Trainingsdaten gefordert, denn nur wenn auch für den Betrieb relevante Daten (Erfahrungen) in ausreichender Anzahl für das Lernen eingesetzt werden, sind die Methoden in der Lage, das Lernproblem optimal zu lösen. Zum anderen gilt Gleiches für die Qualität der Trainingsdaten, sodass gerade für real gemessene Größen die Behandlung von verrauschten, fehler- oder lückenhaften Daten notwendig ist. Neben den Testdaten stellt die Bewertung der Performanz (P) eine weitere Herausforderung dar. Nur wenn die Bewertung für den gesamten Einsatzbereich mit realen Daten valide ist, wird auch die Methode das Lernproblem korrekt bearbeiten.

22.3.2 Beispiele

Folgende Beispiele dienen als kleine Stichprobe für Bereiche, die mit Verfahren des Maschinellen Lernens adressiert werden können.

Airbagauslösung [16, 17]

Das Lernproblem besteht aus der Zuordnung von Sensorwerten zu dem Befehl der Auslösung eines Fahrzeugairbags. Dafür wird ein Klassifikator gelernt, der Unfälle entweder der Klasse „auslösen“ oder „nicht auslösen“ zuordnet. In diesem Beispiel hat der Datensatz eines Unfalls 30 Dimensionen und besteht beispielsweise aus Beschleunigungs-, Druck- oder Körperschallsensoren an verschiedenen Punkten im Fahrzeug. Für 40 Trainingsdatensätze, bei denen die Sensorwerte für repräsentative Unfälle aufgezeichnet werden, wird zusätzlich bewertet (gelabelt), ob eine Auslösung der Airbags notwendig wäre oder nicht.

Fahrtrajektoriensteuerung mit KNN [18]

Das Projekt ALVINN (autonomous land vehicle in a neural network) hatte das Ziel, ein Fahrzeug auf der optimalen Fahrtrajektorie innerhalb seines Fahrstreifens zu positionieren. Die Trainingsdaten bestehen aus den Eingangsgrößen, den einzelnen Pixeln eines Kamerabildes und der zugehörigen Ausgangsgröße, dem Lenkwinkel. Aufgezeichnet werden diese während der Fahrt eines menschlichen Fahrers. Gelernt wird ein Künstliches-Neuronales-Netz, an dessen 960 Eingangsknoten die einzelnen Werte der 30 x 32-Pixel des Kamerabildes übergeben werden. Diese Eingangsknoten sind über vier versteckte Knoten mit den 30 Ausgabeknoten verbunden, die jeweils für eine eigene Krümmung stehen.

22.4 Die Automation, die den lernenden Fahrer ersetzt

Für die Automobilindustrie ist Maschinelles Lernen und Künstliche Intelligenz nicht nur bei der Automatisierung der Fahrzeugführung von Interesse, sondern auch in anderen Bereichen wie dem Design, der Produktion oder dem After-Sales-Management [19]. Diese Bereiche werden jedoch für die Betrachtung ausgeschlossen, genauso wie der Bereich des Infotainments. Im Fokus steht die Fahrzeugautomatisierung, die nach heutigem Verständnis aus folgenden Komponenten besteht, um ein Fahrzeug im öffentlichen Straßenverkehr zu bewegen:

1. Perception von Umfeld- und Fahrzeugzustandsgrößen,
2. Kognition dieser Größen zu einer Weltrepräsentation,
3. Verhaltensentscheidung basierend auf der Weltrepräsentation und
4. Verhaltensausführung.

Diese Komponenten liefern die Eigenschaften, die nach Mitchell (s. Abschn. 22.3) bereits zu einem erfolgreichen Einsatz von Maschinellern geföhrt haben. Die zunehmende Perception von Umfeld- sowie Fahrzeugzustandsgrößen liefert eine Vielzahl maschinenlesbarer Informationen. Denn zum einen nimmt die Leistungsfähigkeit der Sensoren und der Signalverarbeitung weiter zu, sodass ein detaillierteres Bild der Welt für die maschinelle Verarbeitung zur Verfügung steht. Zum anderen steigt die Anzahl an Sensoren und damit ausgestatteter Fahrzeuge auf der Roadmap zur Vollautomatisierung. Daraus folgt, dass die Qualität und Quantität an Trainingsdaten für Maschinelles Lernen zunimmt. Die zweite Eigenschaft gilt besonders für manche Bereiche der Kognition und Verhaltensentscheidung, denn für die menschlichen Prozesse, die es zu ersetzen gilt (s. Abschn. 22.2), existieren vorwiegend Theorien. Anhand des von der EU geförderten Human Brain Projects und den damit einhergehenden Forschungsarbeiten ist ersichtlich, dass noch eine Vielzahl von ungelösten Fragestellungen existiert und somit das Wissen für effektive Algorithmen fehlt. Die dritte Eigenschaft liefert der Straßenverkehr. Wie schon in Abschn. 22.2 beschrieben, erfordert die Welt, in der sich das Fahrzeug bewegt, die Anpassung an sich ändernde Umgebungsbedingungen, weshalb eine Implementation von Maschinellern in der Automation, die sich diesen Änderungen anpassen kann, naheliegt.

Neben diesen drei Motivatoren für den Einsatz des Maschinellen Lernens existieren jedoch auch besondere Herausforderungen, die dem Einsatz entgegenstehen. Das Besondere der für autonomes Fahren notwendigen vier Komponenten (Perception, Kognition, Verhaltensentscheidung, Verhaltensausführung) gegenüber anderen Anwendungen des Maschinellen Lernens ist der Eingriff in das reale Verhalten des Fahrzeugs, sodass, unabhängig, an welcher Stelle dieser Kette ein unerwünschtes Verhalten auftritt, sich dieses zu einem Ausfall und einem Unfall weiterentwickeln kann. Um den Einsatz von Verfahren des Maschinellen Lernens in der Fahrzeugautomatisierung zu diskutieren, erfolgt deshalb zunächst die Klassifizierung sicherheitsrelevanter Systeme sowie die Zuordnung der Fahrzeugautomatisierung zu einer dieser Klassen.

22.4.1 Sicherheitsrelevante Systeme

Nach DIN 31000 gilt:

Sicherheit ist eine Sachlage, bei der das Risiko nicht größer als das Grenzkrisiko ist. [20]

Inwieweit ein System im Automobil (oder auch generell) diese Sicherheit beeinflusst, kann folgendermaßen eingeteilt werden ([16] erweitert):

1. Sicherheitsunkritisch

Fehler in diesem System führen zu keiner Gefährdung von Personen oder der Umwelt. Eine fehlerhafte Spracherkennung, die oft mit Verfahren des Maschinellen Lernens umgesetzt wird [21], ist beispielsweise sicherheitsunkritisch, wenn diese im Infotainment genutzt wird. Deshalb sind solche Systeme bereits im Einsatz, obwohl zum Teil regelmäßig Fehler auftreten, ohne dass die Sicherheit negativ beeinflusst wird.

2. Sicherheitsrelevant

Ein System wird als sicherheitsrelevant bezeichnet, wenn durch Fehler dieses Systems eine Gefährdung von Personen oder der Umwelt eintreten kann.

c. System zur Entscheidungsunterstützung

Hier können die Vorschläge des Systems durch den Entscheider ausgeführt werden oder eben nicht. Ein Anästhesist bekommt beispielsweise einen Vorschlag für die Medikamentenvergabe, basierend auf Informationen über den Patienten, die Operation und vergangene Erfahrungswerte. Ein Fehler des Systems würde den Patienten gefährden, jedoch nur dann, wenn der Anästhesist dem Vorschlag folgt [22].

d. System zur Überwachung und Diagnose

Ein Fehler des Systems führt zum Ausbleiben einer Warnung und kann, wenn der Fehler nicht anderweitig erkannt wird, zu einer Gefahr für Personen und Umwelt werden. Versagt das Diagnosesystem einer Industriemaschine beim Auftreten fehlerhaften Verhaltens, so kann ein Ausfall dieser Diagnose zu einer Gefahr werden [23].

3. Sicherheitskritisch

Systeme, die bei einem Fehler direkt zu einer Gefährdung von Personen oder der Umwelt führen, werden als sicherheitskritisch bezeichnet.

a. Automation überwacht/korrigierbar

Wird eine Aktion ohne zusätzliche Bestätigung automatisiert ausgeführt, so führt der Fehler eines automatisierten Systems direkt zu einer Gefährdung von Personen und Umwelt. Wird das System zusätzlich durch einen Menschen überwacht und ist die Möglichkeit zur Korrektur gewährleistet, kann die Gefahr abgewandt werden. Der/die Überwacher/in bringt das System wieder unter Kontrolle, sodass Fehlertoleranz durch den Menschen hergestellt wird. Dabei ist zu beachten, dass besonders mit zunehmender Automatisierung der Prozesse und erweiterter Entlastung des Menschen dessen Fähigkeiten abnehmen, einen automatisierten Prozess zu überwachen [24]. Der sogenannte Stauassistent als Teilautomatisierung der Fahrzeugführung bildet ein solches

sicherheitskritisches System, denn ein fehlerhaftes Systemverhalten birgt direkt eine Gefahr. Diese Gefahr wird jedoch mit der Überwachung durch den Fahrer adressiert, denn der Stauassistent ist so entwickelt, dass der Mensch fehlerhaftes Systemverhalten durch sein Eingreifen kontrolliert.

b. Automation nicht überwacht/ohne Korrekturmöglichkeit

Sicherheitstechnisch am kritischsten ist eine Automation ohne Korrekturmöglichkeit. Ein Fehler des Systems führt ohne Überwachung direkt zu einer Gefährdung und abhängig von der Situation zu einem Schaden von Personen und Umwelt. In diese Kategorie ist das vollautomatisierte Fahren einzuordnen, denn nach Definition muss der Insasse des Fahrzeugs dieses nicht mehr überwachen. Somit führt ein durch das System nicht adressierter Fehler oder ein unerwünschtes Verhalten direkt zu Gefahr und eventuellem Schaden von Personen und Umwelt.

Diese Kategorisierung und die Einordnung der autonomen Fahrt in die Kategorie *nicht überwachte Automation* zeigt, warum aktuell vorhandene Verfahren des Maschinellen Lernens aus sicherheitsunkritischen bzw. sicherheitsrelevanten Bereichen nicht einfach direkt übernommen werden können. Nicht ohne Grund sind die Berichte über sicherheitskritische Beispiele aus Abschn. 22.3.2 ohne Verweis auf einen nicht überwachten Einsatz.

Der Einsatz von Verfahren des Maschinellen Lernens in einer Automation, die nicht überwacht oder ohne Korrekturmöglichkeit ist, bedarf einer weiteren Einordnung, denn abhängig vom Zeitpunkt im Systemlebenszyklus eines Fahrzeugs leiten sich unterschiedliche Herausforderungen ab.

22.4.2 Herausforderungen und Lösungsansätze in den verschiedenen Phasen des Systemlebenszyklus

Der Fahrzeuglebenszyklus wird in diesem Bericht in die fünf Phasen Forschung, Entwicklung, Betrieb, Service sowie Nutzerwechsel/Stilllegung aufgeteilt, denn in jeder Phase warten auf den Einsatz des Maschinellen Lernens unterschiedliche Herausforderungen.

22.4.2.1 Forschung

Wird Maschinelles Lernen in der Forschung eingesetzt, geht es zumeist darum, die Machbarkeit von Verfahren zu zeigen. Die Bandbreite der Beispiele reicht von Online, Offline, Supervised, Unsupervised bis hin zu Reinforcement Learning. Als Datenbasis werden beispielhafte Trainingsdatensätze herangezogen. Gleiches gilt für die Bewertung der Leistungsfähigkeit und Robustheit der Verfahren. Diese wird innerhalb von kontrollierten und/oder überwachten Bedingungen basierend auf beispielhaften Testdaten bzw. Testfahrten durchgeführt. Besonders kontrollierte Bedingungen und/oder der Einsatz ausgebildeter Testfahrer (Kategorie 3.a, s. Abschn. 22.4.1) machen Fehler tolerierbar, sodass eine Vielzahl von umgesetzten Beispielen existiert. Dementsprechend gehört zur Herausforderung für den Einsatz maschineller Lernverfahren nicht der Nachweis der Sicherheit. Die Her-

ausforderung für den Einsatz von Maschinellern im Forschungsbereich des automatisierten Fahrens besteht im Zugang zu repräsentativen Daten für den späteren Einsatzbereich. Folglich stellt sich die Frage nach der Übertragbarkeit der Forschungsergebnisse auf die Systemlebenszyklen Entwicklung und Betrieb.

22.4.2.2 Entwicklung

Das Lernen während der Entwicklungsphase kann mit dem Offline-Lernen verglichen werden. Möglichst anwendungsrelevante Trainingsdaten werden gezielt gesammelt, um während der Entwicklung beispielsweise ein Modell zu lernen. Die Erfüllung der Anforderungen an die Sicherheit der Ergebnisse wird, wie bei allen anderen sicherheitsrelevanten Komponenten des Fahrzeugs auch, verifiziert und validiert, sodass die Freigabe des Fahrzeugs für die Produktion und den Einsatz erteilt werden kann. Danach verändern sich das gelernte Modell oder die Klassifizierung nicht weiter. Das Lernverfahren arbeitet nicht online bzw. nicht adaptiv, nutzt somit weitere Daten, die im Betrieb erfahren werden, nicht als Trainingsdaten, um das Modell oder die Klassifizierung zu aktualisieren. Es handelt sich somit während des Einsatzes um ein zeitinvariantes System, wodurch die bekannten Methoden für Verifikation und Validierung gültig bleiben. Allerdings ist zu beachten, dass die Ergebnisse der verschiedenen maschinellen Lernverfahren unterschiedlich gut interpretierbar sind. Beispielsweise sind gelernte Entscheidungsbäume mit begrenztem Umfang oder ein überschaubarer Satz an gelernten Regeln sehr gut interpretierbar [25] und ermöglichen somit den Einsatz von White-Box-Testverfahren [26]. Andere Verfahren wie z. B. die Random-Forest-Verfahren oder subsymbolische Neuronale Netzwerke hingegen sind für einen Tester schwer interpretierbar und stellen somit eine Black-Box dar. Für solche komplexe Komponenten bedeutet der Nachweis der Sicherheit eine größere Herausforderung, verglichen mit analytischen Modellen. Da sich, wie auch für die meisten analytischen Modelle, für Systeme mit hoher Eingangsdimensionalität das Brute-Force-Testen² nicht eignet [27], werden Otte [25] folgend und erweiternd vier Gegenmaßnahmen in Betracht gezogen:

1. Herunterbrechen eines vieldimensionalen Problems auf niedrigdimensionale Teilmodelle, damit die Teilmodelle von Experten unabhängig interpretiert und validiert werden können,
2. Einsatz von Vergleichslösungen, die eine Bewertung der Sicherheit der gelernten Komponente ermöglichen,
3. Begrenzen der Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsgrößen auf bestimmte Wertebereiche, wie z. B. die der Trainingsdaten. Diese Begrenzungen können statisch sein, aber auch von anderen Größen abhängen, und
4. Begrenzen der Dynamik von Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsgrößen auf minimale, maximale, positive oder negative Änderung pro Zeit.

² Der Brute-Force-Ansatz steht für das Ausprobieren (Testen) aller möglichen Kombinationen der das Testobjektverhalten beeinflussenden Parameter.

Jede dieser Maßnahmen beschränkt das Potenzial des Maschinellen Lernens, um den Test des gelernten Systems zu ermöglichen.

22.4.2.3 Betrieb

Befindet sich das fertig entwickelte und produzierte Fahrzeug im Betrieb, fallen Daten über den realen Einsatzbereich an, und zwar über die statische Umwelt, andere Verkehrsteilnehmer und ihr Verhalten sowie den Nutzer und die Insassen des Fahrzeugs. Zusätzlich besitzt das Fahrzeug Daten über sein maschinelles Verhalten über der Zeit. Diese direkt vorhandenen neuen Informationen, die zuvor nicht zugänglich waren, motivieren den Einsatz von Online-Lernverfahren und somit adaptiven Systemen. Damit wird das Fahrzeug zu einem zeit- bzw. erfahrungsvarianten System. Dieser weitere Freiheitsgrad eines sich ändernden und zusätzlich nicht überwachten Systems ergibt eine besondere Herausforderung für das Testen und die Absicherung, die schon für zeitinvariante, autonome Systeme bisher nicht gelöst wurde (s. Kap. 21). Grundsätzlich lassen sich zwei Möglichkeiten aufzeigen, wie ein System, das sich während des Betriebs verändert, abzusichern wäre. Entweder wird die Adaptivität auf einen klar begrenzten, einhüllenden Bereich eingeschränkt, wie etwa bei Adaptive Transmission Control-Strategien [28]. Dort sind Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsraum auf wenige Parameter begrenzt [29], sodass aus Autorensicht eine Verifikation und Validierung während der Entwicklungsphase möglich scheint. Widerspricht diese Begrenzung dem Einsatzzweck von Maschinellern während des Betriebs, ist eine Online-Überprüfung des sich ändernden, zeitvarianten und komplexen Systems notwendig [30]. Dafür wiederum bieten sich die zwei folgenden Ansätze an [30]:

1. Runtime Verification & Validation

Im Gegensatz zum klassischen Vorgehen der Verifikation und Validierung während des Entwicklungsprozesses durch den Entwickler wendet das System während des Betriebs Verifikations- und Validierungs-Methoden an [27, 30, 31]. Prinzipiell wird der Adaptionsprozess als Feedback-Loop gesehen. In Abb. 22.1 sind die vier Schritte Beobachten, Ana-

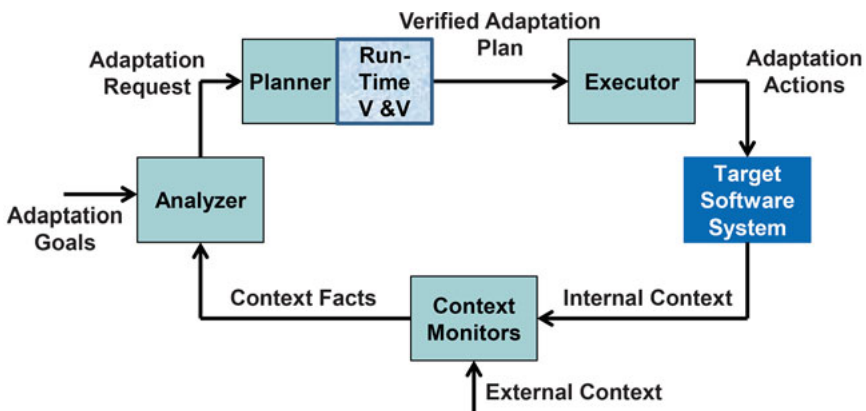


Abb. 22.1 Adaptionsprozess als Feedback-Loop mit Runtime Verification & Validation (nach [31])

lysieren, Planen und Ausführen dargestellt, die nach Tamura et. al. [31] für eine strukturierte Betrachtung des Adaptionprozesses notwendig sind. Diese Darstellung lässt sich direkt auf Online-Lernverfahren übertragen. Wird in diesem Prozess eine Adaption des Systems ermittelt, ist diese mit Verfahren der Runtime Verification & Validation zu prüfen, bevor sie auf die ausführende Software angewandt wird. Dabei wird überprüft, ob durch die geplanten Änderungen das System den sicheren Bereich (*viability zone*) nicht verlässt. Konkret bedeutet dies für das autonome Fahren, dass vor Implementation der Änderung online zu überprüfen ist, ob die aktualisierte Fahrzeugführung die Anforderungen an Sicherheit erfüllt.

Die dabei eingesetzten Verfahren wie beispielsweise Modellprüfung (*model checking*) oder automatische Theorembeweiser (*theorem proving*) stoßen dabei, wie in Kap. 21 beschrieben, an ihre Grenzen. Auch der Einsatz von Software-in-the-Loop-Verfahren wäre denkbar, jedoch ist fraglich, ob ausreichend Rechenleistung für solche Verfahren in Serienfahrzeugen vorhanden ist.

2. Validierung und Verifikation durch Monitoring und Fehlertoleranz

Ist eine Überprüfung der Sicherheit des Systems vor Aktualisierung der Software nicht möglich, kann ein Fehler (*fault*) auftreten und zu einem Ausfall (*failure*) führen und somit zu einer Gefahr werden. Um dies zu verhindern, ist das System fehlertolerant auszulegen. Ein solches fehlertolerantes System bedarf grundsätzlich zweier Komponenten [32]: zum einen einer Überwachung (*monitoring*) der Zustände und des Verhaltens des Systems, um basierend auf einer Bewertung zu entscheiden, ob ein Fehler (*fault*) vorhanden ist. Zum anderen wird eine Redundanz benötigt, an die im Fehlerfall „übergeben“ werden kann. Abb. 22.2 zeigt schematisch diesen Aufbau. Dieses Prinzip entspricht dem menschlichen Überwacher, der im Fehlerfall eines teilautomatisierten Systems die Fahrzeugführung übernimmt.

Die durchgeführte Betrachtung zeigt, dass Maschinelles Lernen während des Betriebs besonders für die Absicherung des sicheren Verhaltens eine Herausforderung darstellt. Beide Verfahren, sowohl die Runtime Verification & Validation als auch die Verifikation und Validierung durch Monitoring benötigen ein Maß für sicheres Fahren. Ansätze für ein solches Maß werden in Abschn. 22.4.3 vorgestellt.

Einen weiteren Ansatz liefert an dieser Stelle der Vergleich mit dem menschlichen Lernen. Die Teilnehmer des Straßenverkehrs akzeptieren, dass ein Mensch ohne weitere

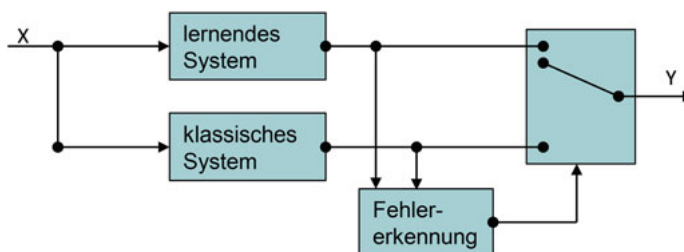


Abb. 22.2 Dynamische Redundanz (nach [32])

Kontrolle basierend auf seinen Maßen für die Fahrzeugführung lernt und sein Verhalten anpasst. Die Überprüfung, ob das angepasste Verhalten den Regeln des Straßenverkehrs genügt, erfolgt nicht direkt, sondern sporadisch über Verkehrs-, oder Geschwindigkeitskontrollen der Polizei. Zusätzlich melden andere Verkehrsteilnehmer schwerwiegendes Fehlverhalten wie z. B. Unfälle, sodass der Mensch dies für den Lernprozess zurückgemeldet bekommt. Übertragen auf das technische System würde dies bedeuten, dass Maschinelles Lernen direkt zu einer Anpassung des Verhaltens führt. Der Test bzw. die Kontrolle, ob diese Anpassung legitim war, erfolgt nachträglich durch andere Verkehrsteilnehmer, die Polizei oder eine spezielle Kontrollinstanz. Dieser Ansatz reduziert die Anforderungen an die Online-Verifikation und -Validierung, denn die Fähigkeiten der anderen Verkehrsteilnehmer werden mit einbezogen. Geschieht der Test erst nach Aktualisierung und Änderung der Funktionen und besteht zusätzlich keine direkte Eingriffsmöglichkeit (Steuerung), wird durch den Betrieb der aktualisierten, aber nicht getesteten Funktion ein erhöhtes Risiko eingegangen.

22.4.2.4 Service

Neben dem Maschinellen Lernen während der Entwicklung und des Betriebs gibt es im Systemlebenszyklus eine weitere Phase, in der gelernt werden kann. Im Rahmen von Serviceangeboten können vom Fahrzeug aufgezeichnete Trainingsdaten heruntergeladen und Funktionen des Fahrzeugs aktualisiert werden. Dafür wird nicht zwangsweise die physikalische Anwesenheit des Fahrzeugs benötigt [33]. Durch dieses Vorgehen wird der Feedback-Loop aus Abb. 22.1 geöffnet. Trainingsdaten und geplante Adaptionen können offline entsprechend einem weiteren Entwicklungsschritt getestet werden, sodass nach dem Nachweis der Sicherheit das Softwaresystem zeitversetzt aktualisiert wird. Da für diese Methoden des Maschinellen Lernens auch personenbezogene Daten das Fahrzeug verlassen könnten, ist zusätzlich zur Sicherheit im Sinne des englischen Begriffs Safety auch der Security-Aspekt zu beachten. Für eine weitergehende Betrachtung wird auf Kap. 24 verwiesen.

22.4.2.5 Nutzerwechsel / Fahrzeugstilllegung

Besitzt das Fahrzeug die angestrebte Möglichkeit, die Ausführung der Fahrzeugführung für einen Nutzer zu personalisieren oder für ein Einsatzgebiet zu optimieren, dann sollten diese erlernten Fähigkeiten bzw. das erlernte Wissen bei einem Nutzerwechsel bzw. einer Fahrzeugstilllegung dem Nutzer und nicht dem Fahrzeug zugewiesen sein. Diese Fähigkeit wird dann besonders interessant, wenn sich beispielsweise beim Vehicle-on-Demand (s. Kap. 2) die Besitzverhältnisse verändern und der Nutzer nicht ein bestimmtes Fahrzeug, sondern nur dessen Mobilitätsdienstleistung erwirbt. Prinzipiell stellt die Übertragung des Wissens für ein technisches System keine Schwierigkeit dar, es ist eher die Stärke des künstlichen Systems, Wissen ohne den langwierigen Lernprozess übertragen zu können. Diese Betrachtung wird in Abschn. 22.5 weiter ausgeführt.

22.4.3 Maße sicheren Fahrens

Wie in den vorherigen Abschnitten beschrieben, wird sowohl für das generelle Verfahren des Maschinellen Lernens als auch für die Verifizierung und Validierung während des Betriebs die Bewertung der Fahrzeugführung in Bezug auf die Sicherheit benötigt. Zunächst kann natürlich nachträglich bewertet werden, ob ein Unfall stattgefunden und mit welcher Aufprallgeschwindigkeit, Aufprallenergie und Unfallkonstellation sich dieser ereignet hat. Dieses Maß hat den Nachteil, dass der Unfall nach Möglichkeit gar nicht auftreten sollte. Daraus folgt, dass für ein sicheres System der Unfall ein extrem seltenes Ereignis sein wird und somit kaum zum Lernen geeignet ist.

Gesucht ist eine Bewertung, die bereits vor Übertreten der fahrphysikalischen Grenzen eine unsichere Fahrt klassifiziert. Dafür wird nach [34, 35] in der Gefahrenbewertung zwischen deterministischem und stochastischem Verfahren unterschieden.

22.4.3.1 Deterministische Verfahren zur Gefahrenbewertung

Nach [36] wird zusätzlich zwischen Identifikatoren aus der Fahrdynamik und Identifikatoren aus dem Abstand unterschieden. Die am einfachsten zu ermittelnden Werte mit jedoch begrenzter Aussagekraft sind Grenzwerte für Längs- und Querschleunigungen sowie die Gierrate. Bei der 100 Cars Study [37] wurden u. a. Längsbeschleunigungen größer als $0,7g$ als Trigger für die Detektion von unsicheren Situationen herangezogen. Die Identifikation einer kritischen Situation ausschließlich bezogen auf Ego-Fahrzeug-Größen ist nicht hinreichend, denn andere Verkehrsteilnehmer können auch ein stehendes Fahrzeug in gefährliche Situationen überführen. Es ist leicht nachzuvollziehen, dass die Sicherheit des Fahrzeugs auch durch andere Verkehrsteilnehmer im Umfeld des Fahrzeugs beeinflusst wird.

Wird das Umfeld für den Anfang zunächst auf den Längsverkehr auf einem Fahrstreifen reduziert, ermöglichen die Time-To-Collision *TTC* bzw. deren Kehrwert eine Aussage über die Sicherheit der Situation. Beispielsweise definiert die ISO 22839 (Forward vehicle collision mitigation systems) als Zeit

$$TTC = \frac{x_c}{v_r},$$

die vergeht, bis das Ego-Fahrzeug mit dem Objekt im Abstand x_c kollidiert, angenommen die Relativgeschwindigkeit $v_r = (v_{ego} - v_{obj})$ bliebe konstant. Diese Größe kann sowohl für das vorausfahrende als auch das nachfolgende Fahrzeug angewandt werden. Aus der *TTC* wird bei Chan [38] ein Kritikalitätsmaß definiert, für das angenommen wird, dass die Schwere eines Unfalls mit dem Quadrat der Geschwindigkeit einhergeht:

$$Criticality\ Index = \frac{v^2}{TTC}.$$

Bleibt die Geschwindigkeit zwischen den Fahrzeugen nicht konstant, wird die Enhanced TTC angewandt. In der ISO 22839 wird diese hergeleitet zu

$$ETTC = \frac{v_r - \sqrt{v_r^2 - 2 \cdot a_r \cdot x_c}}{a_r}.$$

Diese Gleichung gilt nur, solange die relative Beschleunigung $a_r = (a_{obj} - a_{ego})$ konstant bleibt. Verzögert ein Fahrzeug in den Stillstand, ist die Gleichung anzupassen (s. dazu [39]). Bei diesen Werten handelt es sich um Bewertungen eines Zustandes, entsprechend einer Situationsaufnahme. Um die situationsübergreifende Bewertung der Fahrsicherheit zu ermöglichen, werden von [40] folgende Verfahren empfohlen:

- Number Of Conflicts (NOC),
- Time Exposed TTC (TET),
- Time Integrated TTC (TIT).

Die Namen der Verfahren sprechen für sich, sodass an dieser Stelle nicht weiter darauf eingegangen, sondern auf [40, 41] verwiesen wird. Weitere einfache Maße sind die Zeitlücke (*time headway*)

$$t_h = \frac{x_c}{v_{ego}}$$

sowie die notwendige Verzögerung a_{req} , um einen Auffahrunfall zu vermeiden. In [41–43] sind weitere Ansätze basierend auf den zuvor erläuterten zu finden.

Werden nun zusätzlich Fahrzeuge, Objekte und Beschleunigungen in lateraler Richtung betrachtet, beispielsweise für die Untersuchung von Kreuzungssituationen, müssen die Maße für eine Sicherheitsbewertung erweitert werden. Der wohl einfachste Ansatz ist die Post-Encroachment Time (PET). Diese zeitliche Größe ist von [44] definiert als “time between the moment that the first road user leaves the path of the second and the moment that the second road user reaches the path of the first”.

Aufgrund der Betrachtung der lateralen Richtung stehen nicht mehr nur zwei Objekt-Fahrzeuge in Beziehung zu dem Ego-Fahrzeug, sondern weitere Objekte. Diese können statisch, aber auch dynamisch aus prinzipiell allen Richtungen der Fahrzeugebene Einfluss auf die Sicherheitsbewertung haben. Tamke [45] liefert hierfür einen Ansatz, indem gegenüber allen Objekten in der Umgebung des Ego-Fahrzeugs beispielsweise mit der euklidischen Norm der Abstand sowie die zeitliche Ableitung des Abstands bestimmt wird. Basierend auf diesen Größen wird die TTC bestimmt, indem mithilfe einer Verhaltensprädiktion die Zeit bis zum Kontakt der Fahrzeughüllen ermittelt wird. Dieser Ansatz wird an dieser Stelle noch den deterministischen Verfahren zugeordnet, da das Verhalten des Ego-Fahrzeugs sowie der dynamischen Objekte dem „constant turn and constant acceleration-Ansatz“ folgen. Der Ansatz an sich liefert jedoch die Möglichkeit, die Prädiktion des Verhaltens auch nichtdeterministisch zu gestalten.

Deterministische Verfahren sind für eine nachträgliche Bewertung der Sicherheit eines erlebten Manövers oder einer Situation geeignet. Wird jedoch auf eine Online-Bewertung von aktuellen Situationen und die Prädiktion auf einen Zeithorizont größer 1 s gezielt, dann ist die Anwendung *per se* fehlerhaft, solange in der Situation Unsicherheiten enthalten sind. Mit Unsicherheiten ist gemeint, dass die Entwicklung der Situation über der Zeit nicht nur einen möglichen deterministischen Verlauf hat, wie oft bei „constant turn and constant acceleration“-Modellen der Einfachheit angenommen wird, sondern viele verschiedene Situationen eintreten können. Beispielsweise könnte das bei der Berechnung der TTC vorausfahrende Fahrzeug auch beschleunigen anstatt weiter zu verzögern und somit eine kritische Situation entschärfen. Um diese Unsicherheiten mit in die Gefahrenbewertung einfließen zu lassen, werden im Folgenden stochastische Verfahren kurz vorgestellt.

22.4.3.2 Stochastische Verfahren zur Gefahrenbewertung

Die Gefahrenbewertung einer einfachen Vorbeifahrt zweier Fahrzeuge, wie in Abb. 22.3 dargestellt, motiviert anschaulich den Einsatz stochastischer Verfahren. Würde von einem deterministischen Verhalten und der Extrapolation von Geschwindigkeit und Lenkwinkel ausgegangen werden, würde eine Vorbeifahrt keine Gefahr bedeuten, denn die Trajektorien bzw. die Aufenthaltsbereiche der Fahrzeuge kreuzen sich nicht. Dies sieht anders aus, wenn Unsicherheiten in Betracht gezogen werden. Wenn das menschgeführte Fahrzeug (s. Abb. 22.3, unterer Fahrstreifen, schwarz) nicht dem Fahrstreifen folgt, können für das autonome Fahrzeug (s. Abb. 22.3, oberer Fahrstreifen, orange) und für das Umfeld Gefahren entstehen.

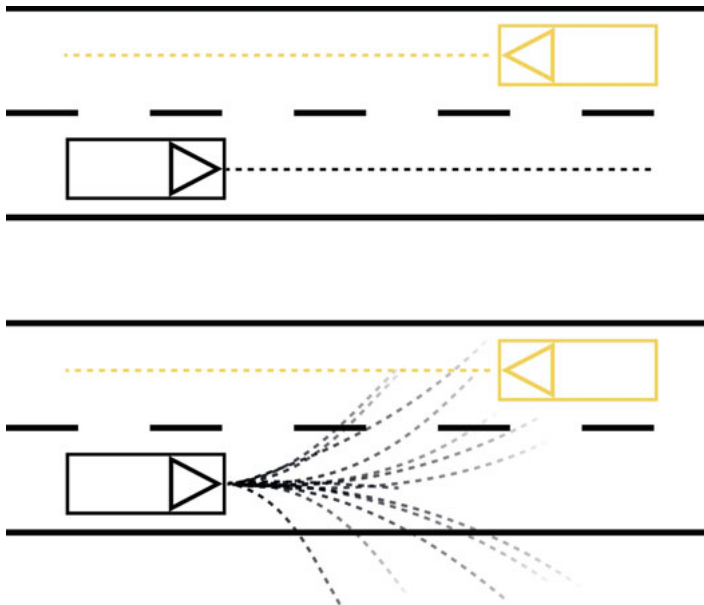


Abb. 22.3 Vergleich Situationsprädiktion einer Vorbeifahrt: deterministisch (oben), stochastisch (unten)

Das damit einhergehende Risiko folgt aus der Wahrscheinlichkeit für einen Unfall sowie aus der potenziellen Schwere dieses Unfalls. Bei beiden Werten handelt es sich um Unbekannte, die es möglichst genau zu schätzen gilt.

Dabei ist der prinzipielle Ansatz [46] für die Ermittlung der Wahrscheinlichkeit, die Trajektorien von Ego-Fahrzeug und Objekten im Umfeld, basierend auf gemessenen Zustandsgrößen, zu präzisieren. Aufgrund der erwähnten Unsicherheiten durch den menschlichen Fahrer, durch Sensoren und Aktoren und einer Interaktion zwischen den Objekten gibt es nicht nur die eine Trajektorie, sondern eine Wahrscheinlichkeitsverteilung der Zustände aller Objekte über der Zeit. Überdecken sich die möglichen Aufenthaltsbereiche der Objekte, besteht eine Wahrscheinlichkeit für einen Unfall. Die möglichen Zustände der Objekte folgen aus eingesetzten dynamischen Modellen und aus definierten Grenzwerten für dynamische Größen. Bei [34] wird dafür ein Einspurmodell für Fahrzeuge eingesetzt, um einen Kompromiss zwischen Prädiktionsgenauigkeit und Rechenaufwand zu finden. Zusätzlich werden die dynamischen Größen wie Beschleunigung und Lenkrate auf – nach Einschätzung des Autors [34] – unkritische und typische Werte begrenzt. In [34, 47] findet sich eine Übersicht über alternative Methoden. Allen Methoden ist gemein, dass die Dynamiksimulation eines Fahrzeugs nicht analytisch erfolgen kann [45], sodass numerische Methoden mit einhergehender Diskretisierung und Vereinfachung einzusetzen sind.

Das Einbeziehen der Schwere in die Gefahrenbewertung wird bei [48] durch eine relative Bewertung jedes Unfalls anhand des unelastischen Stoßes angenähert. Dies entspricht dem auf der Potential Collision Energy (PCE) basierenden Ansatz [40]. Darüber hinaus wurden jedoch keine Ansätze gefunden, die sowohl Schwere als auch Wahrscheinlichkeit in Kombination bestimmen. Ein Grund dafür sind auf der einen Seite ungenaue analytische Regressionsmethoden [49] und auf der anderen Seite rechenintensive Finite-Elemente-Methoden (FEM), die aktuell auch in anderen Bereichen für die Unfallschwerebestimmung eingesetzt werden [50]. Meier et al. [49] liefern hierfür einen neuen Ansatz, der auf symbolischer Regression basiert. Mithilfe einer Datenbank von Crashsituationen (gewonnen durch FEM-Berechnungen) werden Regressionsfunktionen gelernt, die für eine Situation die zugehörige Unfallschwere innerhalb von wenigen Millisekunden vorhersagen. Dafür werden Precrash-Informationen wie Fahrzeugmasse, Geschwindigkeiten, Kollisionspunkt und Kollisionswinkel genutzt. Nachteil dieses Ansatzes ist die bedingte Interpretierbarkeit, da das Regressionsmodell nicht aus physikalischen Größen gebildet wird. Wenn dieser Ansatz eine valide Prädiktion der Schwere liefert, könnte damit die Risikobewertung um eine Schwerebewertung ergänzt werden.

Für die Bewertung der Sicherheit der adaptiven automatisierten Fahrzeugführung sind die vorgestellten Verfahren aktuell aus folgenden Gründen noch nicht umfassend geeignet. Zum einen basieren sämtliche Ansätze auf einer Reihe von Vereinfachungen wie beispielsweise der Vernachlässigung von Wetterbedingungen, der Vereinfachung der Fahrdynamik sowie der fehlenden Betrachtung von Sensorunsicherheiten. Zum anderen bieten die aktuellen Verfahren, wie vorgestellt wurde, noch keine validierte und kombinierte Ermittlung der Wahrscheinlichkeiten und Schwere von Unfällen. Eine allgemeine Definition und Bewertung der Sicherheit der Fahrzeugführung ist somit aktuell noch nicht gegeben.

Allerdings liefert die voranschreitende Fahrzeugautomatisierung begünstigende Faktoren. Diese sind zum einen das Entfernen der Unsicherheit des Fahrers (Ego-Fahrzeug). Zwar ist menschliches Verhalten durch die anderen Verkehrsteilnehmer weiterhin vorhanden, die Trajektorie des Ego-Fahrzeugs ist jedoch innerhalb der Regelgüte bekannt. Außerdem steigt die Sensorleistungsfähigkeit aktueller Fahrzeuge, sodass Unsicherheiten über die Objektzustände abnehmen. Ferner werden zusätzliche Informationen über das Umfeld per V2X-Kommunikation ausgetauscht und damit die Informationsgrundlage für eine Gefahrenbewertung in Qualität und Quantität verbessert.

22.5 Die Automation als Teil eines lernenden Kollektivs

Die Betrachtung des lernenden Fahrzeugs beschränkte sich in diesem Kapitel bisher auf den Systemlebenszyklus eines speziellen Fahrzeugs. Was die Fahrzeugautomatisierung jedoch implizit mit sich bringt, ist die Vervielfältigung der Hard- und Software durch die angestrebte Serienproduktion auf ein ganzes Kollektiv von Fahrzeugen. Entsprechend würden sich Fahrzeuge im Straßenverkehr bewegen, die gleiche Fähigkeiten aufweisen. Dies hat auf der einen Seite den Nachteil, dass Fehlverhalten, Ausfälle und Unfallarten nicht nur ein Fahrzeug, sondern gleich das gesamte Kollektiv betreffen können. Auf der anderen Seite eröffnet es einen weiteren Freiheitsgrad für adaptive Systeme. Eine Datenaustauschmöglichkeit vorausgesetzt, ergibt sich die Möglichkeit zum Kollektiven Lernen während des Betriebs. Dabei lassen sich prinzipiell zwei Ansätze unterscheiden [51]: das agentenbasierte Maschinelle Lernen und das Maschinelle Lernen mit Agenten. Bei dem agentenbasierten Lernen (auch oft agentenbasierte Schwarmintelligenz genannt) baut sich das lernende kognitive System aus einer Vielzahl von vernetzten Agenten mit begrenzter kognitiver Leistungsfähigkeit auf, dabei wird oft das Verhalten von Tieren wie Ameisen oder Bienen als Beispiel herangezogen [52]. Im Gegensatz dazu besteht das Maschinelle Lernen mit Agenten ebenfalls aus mehreren Agenten, die jedoch die in Abschn. 22.3 beschriebenen Verfahren anwenden. Diese zwei Ansätze unterscheiden sich in den grundlegenden Schritten des Maschinellen Lernens hinsichtlich

- kollektiver Erfahrungsgenerierung,
- kollektiver Leistungsbewertung und
- Ableitung von gelernten Modellen und von Wissen.

Grundsätzlich können, sobald Daten von der realen Situation erzeugt wurden, die Ansätze angewandt werden. Dabei stellt sich die Frage, an welcher Stelle eines Kollektivs aus den Daten relevante Informationen erzeugt werden, diese im Sinne des Lernproblems und des Leistungsmaßes bewertet werden und basierend darauf Lernverfahren eingesetzt werden. Nicht zuletzt aus Gründen der begrenzten Bandbreite für die Datenübertragung wird es notwendig sein, bereits verarbeitete Daten oder sogar die gelernten Modelle und das Wissen zu übertragen, anstelle von Sensorrohdaten. Solange die beteiligten Agenten/Fahrzeuge

dabei einer Serie und einem Softwarestand angehören, folgen Anforderungen an die Integrität der übertragenen Informationen, jedoch nicht an die Kompatibilität und Vertrauenswürdigkeit zwischen den Agenten. Sogenannte homogene Teams existieren, bei denen untereinander bekannt ist, wie und was gelernt wird. Ist das Ziel jedoch, die Datenbasis zu erweitern, auf der Lernverfahren angewandt werden, könnten auch Fahrzeuge anderen Softwarestands oder sogar anderer Hersteller untereinander vernetzt werden. Es entsteht ein Kollektiv aus heterogenen Fahrzeugen, bei denen eventuell unterschiedliche Verfahren des Maschinellen Lernens eingesetzt werden und die Wissensrepräsentation ebenfalls heterogen ist. Gifford [53] zeigt für Beispiele aus anderen Bereichen, wie prinzipiell mit solchen Kollektiven umgegangen werden könnte. Grundsätzlich existieren neben den Fahrzeugrobotern noch weitere Agenten, wie beispielsweise Smartphones oder zukünftig auch Serviceroboter, die ebenfalls Daten erzeugen und damit vollkommen andere Informationsbereiche abdecken, als sie Fahrrobotern zugänglich sind. Die aktuell vorstellbare letzte Stufe der Konnektivität und mit Abstand die größte Datenbasis liefert das Internet. Das autonome Fahrzeug als *web-enabled device* ermöglicht eine Vielzahl von Anwendungen und Funktionen im positiven wie auch im negativen Sinne. Nicht zuletzt das Watson-Projekt von IBM zeigt, dass Teile des im Internet abgelegten Wissens auch für Maschinen verständlich sind. Informationen, die von einer beliebigen Instanz über das Internet zugänglich gemacht werden, müssten somit nicht erst erfahren werden, um das Verhalten des autonomen Fahrzeugs zu beeinflussen. Durch den Zugriff auf beliebige (nicht autorisierte bzw. anonyme) Quellen droht jedoch eine Herausforderung für die Sicherheit sowohl im Sinne der Verkehrssicherheit (*safety*) als auch der Datensicherheit (*security*, s. Kap. 24).

22.6 Fazit

Das Maschinelle Lernen findet in der Forschung aktuell großes Interesse, da die Qualität und Quantität vorhandener Daten stetig zunimmt und zusätzlich die Fahrzeugautomatisierung Fragen aufwirft, die nur bedingt mit herkömmlichen analytischen Ansätzen gelöst werden können. Bei der Übertragung der Ergebnisse von der Forschung auf die Entwicklung der Serienfunktionen für die autonome Fahrzeugführung stellt jedoch vor allem der Nachweis der Sicherheit für den Einsatz im nicht überwachten sicherheitskritischen System ohne Korrekturmöglichkeit eine Herausforderung dar. Deshalb finden sich bereits in aktuellen Serienfahrzeugen nach Wissensstand der Autoren nur gelernte Modelle, die sich nach dem Test und der Freigabe nicht mehr ändern. Systeme wie die Adaptive Transmission Control sind bei dieser Betrachtung aufgrund der geringen adaptiven Parameter in klar begrenzten Wertebereichen ausgeschlossen. Allerdings öffnet gerade das Lernen im Betrieb und somit die Adaption einen weiteren Freiheitsgrad für die Automation. Diesen Freiheitsgrad zu nutzen, motiviert neben der Kompensation des Wegfalls der Anpassungs- und Lernfähigkeit des Menschen sowie der Individualisierung der Fahrzeugführung zusätzlich die Möglichkeit, die autonome Fahrt zu optimieren. Das Kapitel zeigt auf, dass bei der

Anwendung des Maschinellen Lernens für die Fahrzeugautomatisierung während des Betriebs sowohl die Verkehrssicherheit (*safety*) als auch die Datensicherheit (*security*) mit hoher Priorität zu betrachten sind. Für die Bewertung der Verkehrssicherheit respektive des Risikos fehlt aktuell noch ein valides Maß. Deshalb liegt nahe, dass der Einsatz von adaptiven Maschinellen Lernverfahren während des Betriebs zunächst eine fehlertolerante Auslegung mit redundanten herkömmlichen Systemen erfordert, bei denen die herkömmlichen Systeme zur Bewertung der Verkehrssicherheit dienen. Somit ist zu erwarten, dass Maschinelles Lernen während des Betriebs (adaptive Systeme) die Fahrzeugautomatisierung zunächst nur innerhalb eines vorgegebenen Rahmens der herkömmlichen Systeme optimieren wird.

Aufgrund der aufgezeigten Herausforderungen hinsichtlich des Nachweises eines sicheren Verhaltens des zeitvarianten adaptiven Systems erscheint es notwendig, intensiv weiter an einer Runtime-Verifikation und -Validierung zu forschen. Gleiches gilt für die zuvor angesprochenen eingesetzten nicht-adaptiven Systeme und deren Nachweis der Sicherheit. Zwar existiert eine Vielzahl an Literatur über bereits erfolgreich eingeführte Beispiele, jedoch kommen diese zumeist aus anderen Bereichen, die keine vergleichbaren Anforderungen an ein Produkt stellen.

In diesem Beitrag wurde die Frage der Datensicherheit (*security*) nur am Rande diskutiert und stattdessen auf Kap. 24 verwiesen. Ansätze des Lernens benötigen Daten und somit Informationen über Insassen, Fahrzeug und Umwelt. Somit kommt dem Datenschutz eine der Verkehrssicherheit (*safety*) gleiche Relevanz zu. Anzumerken ist, dass die Umwelt natürlich auch die Personen in dieser und somit deren Datenschutz beinhaltet. Die Qualität und Quantität der für die Fahrzeugautomation benötigten Sensoren ist auf der einen Seite Antreiber des Maschinellen Lernens, aber auf der anderen Seite jedem Datenschützer suspekt. Eine besondere Eigenschaft der Fahrzeugsensoren ist zusätzlich, dass diese aktuell zu einem Großteil nicht physikalisch abgedeckt werden, wenn das Fahrzeug oder die Funktion nicht aktiv ist. Mit dem Einsatz des Maschinellen Lernens sollte dementsprechend direkt auch die Datensicherheit angesprochen werden.

Nichtdestotrotz bringt gerade der Einsatz von vernetzten Agenten und lernenden Systemen Vorteile, deren Auswirkungen nicht abzuschätzen sind. Kollektiv lernende Agenten müssen sich vorhandenes Wissen nicht langwierig aneignen, sondern können es per Datenübertragung (*copy & paste*) an nächste Fahrzeug- bzw. - Softwaregenerationen übergeben. Dies, verbunden mit einem Zugriff auf die große Menge von elektronisch erfassten Informationen, besitzt das Potenzial, die Fahrzeugführung, den Straßenverkehr und somit das ganze (Mobilitäts-)Verhalten der Menschen zu verändern. Dabei sind die Erkenntnisse, die für die Fahrzeugführung gewonnen werden, in gleichem Maße für die Forschung an medizinischen Robotern sowie Haushaltsrobotern mit Menschenkontakt von Interesse. Aufgrund der ähnlichen Rahmenbedingungen gilt Gleiches auch umgekehrt, was für eine enge Zusammenarbeit zwischen Fahrzeugtechnik und Robotik spricht.

Literatur

1. Rasmussen, J.: Skills, Rules, and Knowledge; Signals, Signs, and Symbols, and Other Distinctions in Human Performance Models. *IEEE Transactions On Systems, Man, and Cybernetics SMC-13(3)*, 257–266 (1983)
2. Donges, E.: Fahrerverhaltensmodelle. In: Winner, Hakuli, Wolf (Hrsg.) *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, pp. 15–23 (2011)
3. Oswald, W.D.: Automobilismus und die „gefährlichen Alten“. In: G. Schmidt (Hrsg.) *Technik und Gesellschaft. Automobil und Automobilismus*, vol. 10, pp. 183–195 (1999)
4. Williams, A.F.: Teenage drivers: patterns of risk. *Journal of safety research* 34(1), 5–15 (2003)
5. Burgard, E.: Fahrkompetenz im Alter: Die Aussagekraft diagnostischer Instrumente bei Senioren und neurologischen Patienten. Dissertation, LMU (2005)
6. Funk, W., Grüninger, M., Dittrich, L., Goßler, J., Hornung, C., Kreßner, I., Libal, I., Limberger, S., Riedel, C., Schaller, S.: Begleitetes Fahren ab 17 – Prozessevaluation des bundesweiten Modellversuchs. *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Unterreihe Mensch und Sicherheit*.(213) (2010)
7. Mitchell, T.M.: *Machine Learning*. McGraw-Hill series in computer science. McGraw-Hill, New York (1997)
8. Breiman, L.: Statistical Modeling: The Two Cultures (with comments and a rejoinder by the author). *Statist. Sci.*, 199–231 (2001)
9. Carbonell, J., Michalski, R., Mitchell, T.: An Overview of Machine Learning. In: Michalski, R., Carbonell, J., Mitchell, T. (Hrsg.) *Machine Learning. Symbolic Computation*, pp. 3–23. Springer Berlin Heidelberg (1983)
10. Ertel, W.: *Grundkurs Künstliche Intelligenz. Eine praxisorientierte Einführung*, 3rd edn. Lehrbuch. Springer Fachmedien, Wiesbaden (2013)
11. Sewell, M.: *Machine Learning*. <http://machine-learning.martinsewell.com/> (zuletzt geprüft 15.07.2014) (2009)
12. Sammut, C. (ed.): *Encyclopedia of machine learning*. 78 tables. springer reference. Springer, New York (2011)
13. Shaoning Pang, Nikola Kasabov: Inductive vs transductive inference, global vs local models: SVM, TSVM, and SVMT for gene expression classification problems – Neural Networks. *Proceedings. 2004 IEEE International Joint Conference on* (2004)
14. Russell, S., Norvig, P., Intelligence, A.: *A modern approach. Artificial Intelligence*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs 25 (1995)
15. March, J.G.: Exploration and exploitation in organizational learning. *Organization science* 2(1), 71–87 (1991)
16. Nusser, S.: *Robust Learning in Safety-Related Domains. Machine Learning Methods for Solving Safety-Related Application Problems*, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (2009)
17. Nusser, S., Otte, C., Hauptmann, W., Leirich, O., Krätschmer, M., Kruse, R.: Maschinelles Lernen von validierbaren Klassifikatoren zur autonomen Steuerung sicherheitsrelevanter Systeme. *at-Automatisierungstechnik Methoden und Anwendungen der Steuerungs-, Regelungs- und Informationstechnik* 57(3), 138–145 (2009)
18. Pomerleau, D.: Neural Network Vision for Robot Driving. In: Hebert, M., Thorpe, C., Stentz, A. (Hrsg.) *Intelligent Unmanned Ground Vehicles*, vol. 388. The Springer International Series in Engineering and Computer Science, pp. 53–72. Springer US (1997)
19. Gusikhin, O., Rychtyckyj, N., Filev, D.: Intelligent systems in the automotive industry: applications and trends. *Knowl Inf Syst* 12(2), 147–168 (2007). doi: 10.1007/s10115-006-0063-1
20. DIN 31000:2011-05: Allgemeine Leitsätze für das sicherheitsgerechte Gestalten von Produkten

21. Deng, L., Li, X.: Machine Learning Paradigms for Speech Recognition: An Overview. *IEEE Trans. Audio Speech Lang. Process.* 21(5), 1060–1089 (2013). doi: 10.1109/TASL.2013.2244083
22. Caelen, O., Bontempi, G., Barvais, L.: Machine learning techniques for decision support in anesthesia. In: *Artificial Intelligence in Medicine*, pp. 165–169. Springer (2007)
23. Widodo, A., Yang, B.-S.: Support vector machine in machine condition monitoring and fault diagnosis. *Mechanical Systems and Signal Processing* 21(6), 2560–2574 (2007). doi: 10.1016/j.ymsp.2006.12.007
24. Bainbridge, L.: Ironies of automation. *Automatica* 19(6), 775–779 (1983). doi: 10.1016/0005-1098(83)90046-8
25. Otte, C.: SCI 445 – Safe and Interpretable Machine Learning: A Methodological Review. In: Moewes, C., Nürnberger, A. (Hrsg.) *Computational intelligence in intelligent data analysis. Studies in computational intelligence*, vol. 445. Springer, Berlin, New York (2013)
26. Burgdorf, F.: Eine kunden- und lebenszyklusorientierte Produktfamilienabsicherung für die Automobilindustrie, KIT Scientific Publishing; Karlsruher Institut für Technologie (2010)
27. Taylor, B.J.: *Methods and procedures for the verification and validation of artificial neural networks*. Springer (2006)
28. Nelles, O.: Lernfähige Fuzzy-basierte Fahrstrategie für automatische Getriebe. In: Isermann, R. (Hrsg.) *Modellgestützte Steuerung, Regelung und Diagnose von Verbrennungsmotoren*, pp. 233–250. Springer Berlin Heidelberg (2003)
29. Cao, C.T., Kronenberg, K., Poljansek, M.: Adaptive transmission control. Google Patents. <http://www.google.com/patents/US5954777> (1999)
30. Dahm, W.: *Perspectives on Verification and Validation in Complex Adaptive Systems*, Notre Dame University. Workshop on Verification and Validation in Computational Science (2011). Accessed 22 July 2014
31. Tamura, G., Villegas, N., Müller, H., Sousa, J., Becker, B., Karsai, G., Mankovskii, S., Pezzè, M., Schäfer, W., Tahvildari, L., Wong, K.: Towards Practical Runtime Verification and Validation of Self-Adaptive Software Systems. In: Lemos, R. de, Giese, H., Müller, H., Shaw, M. (Hrsg.) *Software Engineering for Self-Adaptive Systems II*, vol. 7475. Lecture Notes in Computer Science, pp. 108–132. Springer Berlin Heidelberg (2013)
32. Isermann, R.: *Fault-diagnosis systems. An introduction from fault detection to fault tolerance*. Springer, Berlin, New York (2006)
33. Stokar, R. von: Software-Updates Effiziente Nutzung von Connected Cars. *ATZ Elektron* 9(1), 46–51 (2014). doi: 10.1365/s35658-014-0387-7
34. Eugen Käfer: *Situationsklassifikation und Bewegungsprognose in Verkehrssituationen mit mehreren Fahrzeugen*, Universität Bielefeld (2013). Accessed 7 July 2014
35. Eidehall, A., Petersson, L.: Statistical Threat Assessment for General Road Scenes Using Monte Carlo Sampling. *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on* 9(1), 137–147 (2008). doi: 10.1109/TITS.2007.909241
36. Benmimoun, M., Fahrenkrog, F., Zlocki, A., Eckstein, L.: Erkennung und Klassifizierung Kritischer Fahrtsituationen Mittels Fahrzeugdaten. *ATZ Automobiltech Z* 114(10), 820–826 (2012). doi: 10.1007/s35148-012-0485-x
37. Guo, F., Klauer, S., Hankey, J., Dingus, T.: Near Crashes as Crash Surrogate for Naturalistic Driving Studies. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2147(–1), 66–74 (2010). doi: 10.3141/2147-09
38. Ching-Yao Chan (ed.): *Defining Safety Performance Measures of Driver-Assistance Systems for Intersection Left-Turn Conflicts*. Intelligent Vehicles Symposium, 2006 IEEE. Intelligent Vehicles Symposium, 2006 IEEE (2006)
39. Winner, H., Geyer, S., Sefati, M.: Maße für den Sicherheitsgewinn von Fahrerassistenzsystemen. In: Winner, H., Bruder, R. (Hrsg.) *Maßstäbe des sicheren Fahrens. 6. Darmstädter Kolloquium Mensch + Fahrzeug*. Ergonomia Verlag, Stuttgart (2013)

40. Dijkstra, A., Drolenga, H.: Safety effects of route choice in a road network. Simulation of changing route choice. SWOV Institute for Road Safety Research, Leidschendam, Netherlands (2008)
41. Yang, H.: Simulation-based evaluation of traffic safety performance using surrogate safety measures (2012)
42. Zhang, Y., Antonsson, E.K., Grote, K.: A new threat assessment measure for collision avoidance systems. Intelligent Transportation Systems Conference, 2006. ITSC '06. IEEE
43. Jansson, J.: Collision avoidance theory with application to automotive collision mitigation. Linköping studies in science and technology. Dissertations, vol. 950. Dept. of Electrical Engineering, Univ., Linköping (2005)
44. Horst, A. R. A. van der: A time-based analysis of road user behaviour in normal and critical encounters. Institute for Perception TNO, Soesterberg, Netherlands (1990)
45. Tamke, A., Dang, T., Breuel, G.: A flexible method for criticality assessment in driver assistance systems. Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2011 IEEE
46. Althoff, M., Stursberg, O., Buss, M.: Model-Based Probabilistic Collision Detection in Autonomous Driving. Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on 10(2), 299–310 (2009). doi: 10.1109/TITS.2009.2018966
47. Althoff, D., Wollherr, D., Buss, M.: Safety assessment of trajectories for navigation in uncertain and dynamic environments. Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on
48. Althoff, D., Kuffner, J., Wollherr, D., Buss, M.: Safety assessment of robot trajectories for navigation in uncertain and dynamic environments. *Auton Robot* 32(3), 285–302 (2012). doi: 10.1007/s10514-011-9257-9
49. Meier, A., Gonter, M., Kruse, R.: Symbolic Regression for Precrash Accident Severity Prediction. In: Polycarpou, M., Carvalho, A. de, Pan, J.-S., Woźniak, M., Quintian, H., Corchado, E. (Hrsg.) *Hybrid Artificial Intelligence Systems*, vol. 8480. Lecture Notes in Computer Science, pp. 133–144. Springer International Publishing (2014)
50. Mukherjee, S., Chawla, A., Mohan, D., Singh, M., Dey, R.: Effect of vehicle design on head injury severity and throw distance variations in bicycle crashes. Proceedings From 20th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles. Lyon (2007)
51. Czarnowski, I., Jędrzejowicz, P.: Machine Learning and Multiagent Systems as Interrelated Technologies. In: Czarnowski, I., Jędrzejowicz, P., Kacprzyk, J. (Hrsg.) *Agent-Based Optimization*, vol. 456. Studies in computational intelligence, pp. 1–28. Springer Berlin Heidelberg (2013)
52. Miller, P.: *Die Intelligenz des Schwarms. Was wir von Tieren für unser Leben in einer komplexen Welt lernen können*. Campus-Verl., Frankfurt am Main [u.a.] (2010)
53. Gifford, C.M.: *Collective Machine Learning: Team Learning and Classification in Multi-agent Systems*. Dissertation, University of Kansas (2009)

Andreas Reschka

Inhaltsverzeichnis

23.1 Einleitung	490
23.2 Sicherer Zustand	490
23.2.1 Sicherer Zustand in Fahrerassistenzsystemen im Serieneinsatz	491
23.2.2 Sicherer Zustand in Versuchsträgern zum autonomen Fahren	493
23.2.3 Zusammenfassung	496
23.3 Sicherheitskonzepte aus anderen Disziplinen	496
23.3.1 Schienenfahrzeuge	496
23.3.2 Rein elektrische Ansteuerung von Aktoren (X-by-Wire)	497
23.3.3 Robotik	498
23.3.4 Kraftwerkstechnik	499
23.4 Sichere Zustände in den Use-Cases	500
23.4.1 Use-Case 1: Autobahnautomat mit Verfügbarkeitsfahrer – Autobahnпилот	500
23.4.2 Use-Case 2: Autonomes Valet-Parken	501
23.4.3 Use-Case 3: Vollautomat mit Verfügbarkeitsfahrer	503
23.4.4 Use-Case 4: Vehicle-on-Demand	503
23.4.5 Zusammenfassung	504
23.5 Sicherheitsrelevante Ereignisse	504
23.6 Aktionen zur Reduzierung des Risikos	505
23.7 Antizipation von Degradationssituationen	506

A. Reschka (✉)

Technische Universität Braunschweig, Institut für Regelungstechnik, Deutschland
reschka@ifr.ing.tu-bs.de

23.8 Dilemma-Situationen	507
23.9 Zusammenfassung	509
Literatur	510

23.1 Einleitung

Die Entwicklung von autonomen Fahrzeugen fokussiert sich derzeit auf die Funktionalitäten von Fahrzeugführungssystemen. In zahlreichen Demonstrationen von Versuchsfahrzeugen wurden beeindruckende Fähigkeiten gezeigt (im Folgenden werden die neuesten zuerst genannt). So z. B. bei der Fahrt auf der Bertha-Benz-Route des Karlsruher Instituts für Technologie und der Daimler AG [69], im Projekt Stadtpilot der Technischen Universität Braunschweig [41], [60] den Aktivitäten der Google Inc. [13], [59], dem Forschungsfahrzeug BRAiVE und dem VIAC Projekt des VisLab-Instituts der Università degli Studi di Parma [4], [8], den Forschungsaktivitäten des Sonderforschungsbereichs 28 der Deutschen Forschungsgemeinschaft [31], [55], [57] und den Resultaten bei der DARPA Urban Challenge [51], [52], [53]. Falls die Versuchsträger am öffentlichen Straßenverkehr teilnahmen, war immer ein Sicherheitsfahrer an Bord, der das technische System überwacht hat. Dieser musste eingreifen, falls ein technischer Defekt auftrat, die aktuelle Situation die Fähigkeiten des Fahrzeugs überforderte oder ein anderes Ereignis dies erforderlich machte. Durch diese notwendige Überwachung des technischen Systems sind die gezeigten Versuchsfahrten im öffentlichen Straßenverkehr nach der Klassifikation von Automatisierungsgraden nach [20] als *teilautomatisiert* einzustufen. Das Ziel zukünftiger Fahrzeugführungssysteme mit höheren Automatisierungsgraden ist jedoch, die Systeme selbstständig in allen Situationen auch ohne überwachende Menschen betreiben zu können.

Bei der Entwicklung von Fahrzeugführungssystemen ist daher ein Sicherheitskonzept notwendig, das die verschiedenen Schritte im Entwicklungsprozess wie z. B. die Spezifikation, den Entwurf, die Entwicklung und den Test der Funktionen abdeckt. Außerdem sind Sicherheitsfunktionen im System notwendig, die einen sogenannten *sicheren Zustand* erreichen können bzw. diesen zu erhalten versuchen.

23.2 Sicherer Zustand

Die Verwendung des Begriffs *sicherer Zustand* ist oftmals nicht eindeutig. Sicherheit als relatives Maß ist abhängig von einer individuellen Einschätzung des Betrachters. Sicherheit besteht nach der Norm ISO 26262 in einem Betriebsmodus eines Systems oder einer Anordnung von Systemen, ohne *unzumutbares* Risiko (vgl. „safe state“, ISO 26262, Part I, 1.102 [30]). Dies beinhaltet, dass Sicherheit nur dann vorliegt, wenn das aktuelle und das zukünftige Risiko unterhalb einer von einer Gesellschaft akzeptierten Schwelle liegen (vgl.

„unreasonable risk“, ISO 26262, Part I, 1.136 [30]). Diese Schwelle ist als nicht akzeptabler Wert in einem spezifischen Kontext gemäß gesellschaftlicher, moralischer und ethischer Auffassungen zu sehen (vgl. ISO 26262, Part I, 1.136 [30]). Unter Risiko wird eine Kombination aus der Auftrittswahrscheinlichkeit und der Schwere eines Personenschadens verstanden (vgl. „risk“ und „harm“, ISO 26262, Part I, 1.99 und 1.56).

Aus diesem Verständnis lässt sich ein sicherer Zustand als ein Zustand mit zumutbarem Risiko eines Systems verstehen. Der häufig verwendete Begriff *risikominimaler Zustand* (z. B. in [20]) ist missverständlich, da dieser das Risiko nicht in eine Relation zu einem akzeptierten Risiko stellt und auch keine Aussage darüber enthält, ob ein System, das risikominimal betrieben wird, auch sicher ist.

Die wesentliche Herausforderung bei der Verwendung des Begriffs *sicherer Zustand* im Sinne eines Zustands mit zumutbarem Risiko für Insassen und weitere Verkehrsteilnehmer ist die Identifikation einer Schwelle, unterhalb der ein Risiko zumutbar ist. Beim Betrieb eines automatisierten Fahrzeugs hängt das zumutbare Risiko von der aktuellen *Situation*, in der sich das Fahrzeug befindet, ab. Zur Situation gehören hier analog zu [21] und [43]

- alle für eine Fahrentscheidung relevanten stationären und dynamischen Objekte,
- die Intention der dynamischen Objekte einschließlich des autonomen Fahrzeugs,
- die geltenden rechtlichen Bedingungen,
- die Mission des autonomen Fahrzeugs,
- die aktuelle Leistungsfähigkeit des autonomen Fahrzeugs.

Für ein autonomes Fahrzeug ist daher eine kontinuierliche Ermittlung des aktuellen Risikos basierend auf der aktuellen Situation und ein Abgleich des Risikos mit dem Schwellwert, der als gerade noch zumutbar gilt, notwendig. Im Sinne der Norm ISO 26262 bedeutet dies, dass für jede Situation und ihre zukünftig möglichen Entwicklungen die Auftrittswahrscheinlichkeit für einen Personenschaden und die Schwere des Personenschadens für jeden beteiligten Verkehrsteilnehmer ermittelt und dann die Handlungsoptionen identifiziert werden müssen, die ein zumutbares Risiko ergeben. Eine technische Lösung für dieses Problem ist dem Autor bisher nicht bekannt.

23.2.1 Sicherer Zustand in Fahrerassistenzsystemen im Serieneinsatz

In Fahrerassistenzsystemen überwacht der Fahrer das technische System und muss dem Verkehrsgeschehen aufmerksam folgen. Er wird bei der Fahraufgabe unterstützt. In der aktuellen S-Klasse von Mercedes-Benz wird das „DISTRONIC PLUS mit Lenk-Assistent und Stop&Go Pilot“ genannte System angeboten, das den Fahrer sowohl bei der Längsführung als auch bei der Querführung unterstützt [49]. Der Fahrer muss jedoch weiterhin dem Verkehrsgeschehen folgen, und die Querführung deaktiviert sich nach einer gewissen Zeit, falls der Fahrer die Hände vom Lenkrad nimmt:

Erkennt der Lenk-Assistent mit Stop&Go Pilot, dass der Fahrer während der Fahrt die Hände vom Lenkrad nimmt, wird der Fahrer intelligent in Abhängigkeit von der Fahrsituation, des Handmomentensensors, der erfassten Umgebung und der Geschwindigkeit optisch im Kombiinstrument gewarnt. Reagiert der Fahrer nicht, ertönt ein Warnton und die Querführung wird deaktiviert. [49]

Durch diese Eigenschaft ist das System als teilautomatisiert nach [20] bzw. *Partial Automation* nach [48] einzustufen. Die Längsführung kann sich ebenfalls beenden und bei geeigneter Signalisierung an den Fahrer übergeben, sobald es zu technischen Störungen kommt oder, je nach Auslegung des Systems, Systemgrenzen wie z. B. eine minimale Geschwindigkeit unterschritten werden [62].

In [25] wurde 2010 ein Sicherheitskonzept für teilautomatisierte und hochautomatisierte Fahrerassistenzsysteme vorgestellt. Jedoch wurden die Begriffe hier noch anders verwendet. In [25] bedeutete *Fully Automated DAS* (FA-DAS) eigentlich *teilautomatisiert* nach [20], da der Fahrer die Quer- und die Längsführung überwachen muss. *Autonomous DAS* (A-DAS) in [25] ist gleichbedeutend mit *vollautomatisiert* nach [20], da der Fahrer nicht dauerhaft überwachen muss und das System selbstständig einen sicheren Zustand erlangen kann. Nach [24] wird der sichere Zustand durch ein Anhalten an einem ungefährlichen Ort erreicht. Da der Fokus auf einem System zur automatisierten Staufahrt auf der Autobahn bis maximal 60 km/h liegt, erscheint das Anhalten auf einem Fahrstreifen als sicherer Zustand, bis ein Mensch die Kontrolle übernimmt. Die relativen Geschwindigkeiten werden aufgrund der Stausituation als gering angenommen [24], [25].

Zum gleichen Ergebnis kommt auch eine Studie zum Potenzial der automatisierten Fahrt auf Autobahnen [45]. Diese entstand im Rahmen der Entwicklung eines Notfallassistenzsystems, das ein Fahrzeug stoppen kann (sicherer Zustand), falls der Fahrer das Bewusstsein verliert oder aus anderen Gründen nicht mehr zur Fahrzeugführung in der Lage ist [32], [45]. Auch in [37] wird ein solches System vorgestellt. Die Sicherheitsanforderungen sind hier höher als bei einem Stauassistenzsystem, da das Fahrzeug nicht einfach anhalten, sondern den fließenden Verkehr verlassen und auf dem Seitenstreifen stoppen soll. Außerdem ist das System auch für den normalen Autobahnverkehr und nicht nur für den Stau konzipiert, sodass es zu sehr hohen relativen Geschwindigkeiten kommen kann. Daraus ergeben sich erhöhte Anforderungen an die Zuverlässigkeit der Umfeldwahrnehmung, da andere Verkehrsteilnehmer bei den Fahrstreifenwechseln auf den Seitenstreifen beachtet werden müssen [45]. Redundante Sensorik zumindest für den Bereich vor, hinter und bei Rechtsverkehr auch rechts neben dem Fahrzeug ist hier erforderlich. Der Nutzen solcher Notfallassistenzsysteme ist dennoch vorhanden, auch wenn das System aufgrund technischer Probleme nicht voll einsatzfähig ist. Ein unkontrolliert fahrendes Fahrzeug auf der Autobahn ist gefährlicher als ein kontrolliert langsam fahrendes oder stehendes Fahrzeug, das durch geeignete Signalisierung auf sich aufmerksam machen kann – selbst wenn der Wechsel auf den Seitenstreifen nicht möglich ist [32], [37].

Zusammenfassend lässt sich für Fahrerassistenzsysteme sagen, dass bei Verfügbarkeit eines Fahrers im Fahrzeug ein sicherer Zustand entweder mit der Übergabe an diesen oder

mit dem Bremsen in den Stillstand erreicht werden kann. Wie bei dem vorgestellten Notfallassistentensystem kann zwar versucht werden, den Seitenstreifen zu erreichen, jedoch sind die Anforderungen hierfür relativ hoch. Auch bei höher automatisierten Systemen stellen die Übergabe an einen möglichen Verfügbarkeitsfahrer und die Abbremsung in den Stillstand mögliche Aktionen zur Erhaltung und Erlangung eines sicheren Zustands dar.

23.2.2 Sicherer Zustand in Versuchsträgern zum autonomen Fahren

Im Fokus der im Folgenden vorgestellten Projekte steht das autonome Fahren auf allen Straßenarten und in allen Umgebungen. Die entwickelten Systeme sollen die Fahraufgabe vollständig übernehmen können und den Menschen als Überwacher nicht mehr benötigen. Über die Sicherheitsfunktionen und Sicherheitskonzepte der verschiedenen Projekte gibt es nur wenige Veröffentlichungen. Dies kann u. a. daran liegen, dass es relativ einfach ist, den Fahrer weiterhin als Überwacher einzusetzen und daher keine umfangreichen Sicherheitssysteme zu nutzen, oder auch daran, dass der funktionalen Sicherheit der Systeme für den fahrerlosen Betrieb bisher keine angemessene Aufmerksamkeit zukommt. Die betrachteten Projekte sind im Folgenden chronologisch gelistet, der erreichte Automatisierungsgrad nach [20] und die eingesetzten Sicherheitsmechanismen werden hervorgehoben.

Die Projekte der 1950er- bis in die 1990er-Jahre fokussierten sich nur auf die funktionalen Aspekte der maschinellen Fahrzeugführung wie z. B. die ersten Ansätze zur Verknüpfung von Infrastruktur und Fahrzeug in den General Motors Research Labs, wo Magnete in die Fahrbahn eingelassen wurden, die dann vom Fahrzeug erkannt werden konnten. Der Fahrer musste dabei ständig auf den Verkehr achten und das System überwachen [17]. In Japan wurde in den 1970er- und 1980er-Jahren die Fahrzeugautomatisierung durch Erkennung von Fahrstreifen mit bildgebenden Kameras erforscht. Auch hier wurde das System dauerhaft vom Fahrer überwacht [58]. Gleiches gilt für die Aktivitäten in den 1990er-Jahren, beispielsweise bei der Demonstration *No Hands Across America* 1995 der Carnegie Mellon University [50], [56]. Hier wurde nur die Querführung maschinell durchgeführt. Auf europäischer Seite ist eine Versuchsfahrt der Universität der Bundeswehr von München nach Odense mit dem Versuchsträger *VaMoRs-P* ebenfalls im Jahr 1995 hervorzuheben. Bei dieser Fahrt wurde die Längs- und Querführung maschinell durchgeführt und vom Fahrer überwacht. Zusätzlich wurden automatische Fahrstreifenwechsel vom Fahrer ausgelöst [36]. Mit dem Versuchsträger *ARGO* des VisLab-Instituts der Università degli Studi di Parma erfolgten ebenfalls Langstreckenfahrten im Jahr 1998. Die Automatisierung deckte neben der Längs- und Querführung auch Fahrstreifenwechsel ab, die vom Sicherheitsfahrer ausgelöst wurden [7]. Alle genannten Projekte sind als teilautomatisiert nach [20] einzuordnen. Der sichere Zustand wurde durch eine Übergabe an den Sicherheitsfahrer erreicht bzw. durch einen Eingriff des Sicherheitsfahrers in die Fahrzeugführung wiederhergestellt. Einen ausführlicheren Einblick in die Entwicklungen in den 1990er-Jahren gibt Dickmanns in [14] mit einem Fokus auf kamerabasierte Bildverarbeitung.

Tabelle 23.1 Fehlercodes (übersetzt aus dem Englischen, aus [6])

Fehlercode	Bedeutung	Aktion
F0	„OK!“	keine Aktion
F1	„Wartung notwendig“	notwendige Wartung berücksichtigen
F2	„Nach Hause zurückkehren“	Rückkehr zur Wartungsstation mit reduzierter Geschwindigkeit
F3	„Sicheres Parken“	auf dem nächsten verfügbaren Parkplatz anhalten
F4	„Sofortiges Anhalten“	sofortiges Anhalten des Fahrzeugs am Straßenrand ohne Gefährdung anderer Verkehrsteilnehmer
F5	„Nothalt“	sofortiges kontrolliertes Bremsen in den Stillstand (mit Lenkfunktion, falls möglich)
F6	„Notbremsung“	sofortiges Stoppen des Fahrzeugs durch Betätigung der Bremsen

Im Projekt *Autonomes Fahren* in Niedersachsen wurde 1998 ebenfalls an der Entwicklung autonomer Fahrzeuge geforscht. In [6] wird ein Sicherheitskonzept beschrieben, das verschiedene Methoden enthält, die auch für heutige Systeme denkbar und sinnvoll sind. In Tab. 23.1 sind Fehlercodes, deren Bedeutung und Aktionen enthalten, die zur Erlangung eines sicheren Zustands vom Fahrzeug ausgeführt werden können. Die gewählte Kategorisierung ist auch für hoch- und vollautomatisierte Systeme nach [20] möglich. Eine ausführlichere Diskussion der Aktionen folgt bei der Betrachtung der jeweiligen sicheren Zustände zu den Use-Cases aus Kap. 2.

In der DARPA Urban Challenge wurden alle teilnehmenden autonomen Fahrzeuge ohne Fahrer an Bord auf einem abgesperrten Militärstützpunkt betrieben. Das Sicherheitskonzept wurde von der DARPA vorgegeben und beinhaltete eine Möglichkeit zum sofortigen Anhalten der Fahrzeuge über eine Fernsteuerung und über Not/Aus-Schalter außen an den Fahrzeugen [2]. Das Sicherheitskonzept des Teams CarOLO der Technischen Universität Braunschweig nutzte die Zeit nach dem Nothalt, um Aktionen der Selbstheilung durchzuführen [19], [22], [44]. Dadurch war das autonome Fahrzeug in der Lage, fehlerhafte Komponenten des Fahrzeugführungssystems neu zu starten [2]. Ähnlich sind auch die anderen Teams im Finale der Urban Challenge vorgegangen [51], [52], [53].

Der Nothalt über eine Fernsteuerung als letzte Aktion zur Erreichung eines sicheren Zustands war nur möglich, weil die Fahrzeuge auf einem abgesperrten Gebiet fuhren, von überwachenden Fahrzeugen verfolgt wurden und die anderen Verkehrsteilnehmer entweder von professionellen Fahrern geführte Fahrzeuge oder autonome Fahrzeuge waren. Im öffentlichen Straßenverkehr wäre eine Fahrt mit den Leistungsfähigkeiten der Versuchsträger zu gefährlich gewesen.

Im Projekt Stadtpilot der Technischen Universität Braunschweig wird teilautomatisiertes Fahren seit 2010 im öffentlichen Straßenverkehr gezeigt [41], [60]. Die Forschung in diesem Projekt ist auf den vollautomatisierten Betrieb des Versuchsträgers *Leonie* ausge-

richtet. Bei der Fahrt im öffentlichen Straßenverkehr muss jedoch ein Sicherheitsfahrer den Verkehr überwachen und eingreifen, bevor es zu gefährlichen Situationen kommen kann.

Das Fahrzeugführungssystem übergibt die Kontrolle an den Sicherheitsfahrer, falls es an Systemgrenzen stößt bzw. Fehler im System auftreten. Da im öffentlichen Straßenverkehr keine anderen Sicherheitsaktionen durchgeführt werden, ist der sichere Zustand die Übergabe an den Fahrer. Da das System in Teilen in der Lage ist, die eigene Leistungsfähigkeit zu ermitteln, wie z.B. die Güte der Lokalisierung, sind auch andere Aktionen möglich. Beispielsweise ist ein Anhalten am Straßenrand oder auch auf dem aktuellen Fahrstreifen denkbar, eine Weiterfahrt mit erhöhten Sicherheitsabständen und mit reduzierter Geschwindigkeit ist ebenfalls möglich, wird bisher aber nur auf dem Testgelände durchgeführt [46], [47].

Mit dem autonomen Versuchsträger Junior 3 demonstrierten die Stanford University und das Volkswagen Electronic Research Lab 2010 automatisiertes Fahren [35], [54]. Der Aufbau des Versuchsträgers ist dem Versuchsträger Leonie aus dem Projekt Stadtpilot ähnlich. Die Aktivierung von automatisierten Fahrfunktionen wird über *silver switches* gesteuert. Diese ermöglichen eine Verbindung zwischen dem Fahrzeugführungssystem und der Aktorik des Fahrzeugs. Im *Fail-safe*-Zustand sind diese Schalter geöffnet, und es besteht keine Verbindung zwischen Fahrzeugführungssystem und Fahrzeug. Dadurch liegt die Kontrolle beim notwendigen Sicherheitsfahrer. Eine Besonderheit ist die Valet-Parken-Funktion des Fahrzeugs, die auf einem abgesperrten Gelände auch ohne Sicherheitsfahrer genutzt werden kann. Zur Sicherheit verfügt das Fahrzeug über eine *e-stop* genannte Funktion, die in ähnlicher Weise auch in der DARPA Urban Challenge genutzt wurde. Die Überwachung des Systems wird mit einem *Health Monitor* realisiert, der Fehlfunktionen von Softwaremodulen erkennt und Funktionen zur Selbstheilung auslöst. Außerdem ist das Fahrzeug selbstständig in der Lage, im Notfall die Bremsen zu betätigen und anzuhalten. Das stehende Fahrzeug ist somit der sichere Zustand, der über den *e-stop* und durch das Sicherheitssystem erreicht wird.

Das VisLab-Institut der Università degli Studi di Parma zeigte 2012 mit dem Versuchsträger BRAiVE teilautomatisiertes Fahren im öffentlichen Straßenverkehr auf einer teilweise gesperrten Strecke. Auf Teilstücken der Strecke war kein Fahrer auf dem Fahrersitz, und nur der Beifahrer konnte über einen Not/Aus-Schalter in die Fahrzeugführung eingreifen. Außerdem war ebenfalls eine *e-stop*-Funktionalität integriert [8], [23].

An der Carnegie Mellon University wurde nach der DARPA Urban Challenge weiter am Versuchsträger BOSS gearbeitet und ein Ansatz zur Überwachung und Rekonfiguration in Echtzeit entwickelt und veröffentlicht [33]. Dieser *SAFER* genannte Ansatz nutzt redundante Softwarekomponenten, die sich im Normalbetrieb im Stand-by befinden und bei Bedarf aktiviert werden können. Dadurch ist es möglich, innerhalb kürzester Zeit von einer defekten Komponente auf eine redundante Lösung umzuschalten. Da keine Hardwareüberwachung stattfindet, werden auch keine Sensoren und Aktoren überwacht, wodurch der Ansatz als Ergänzung zu Methoden der Hardwareredundanz zu nutzen ist.

Als letztes Beispiel für die derzeitige Entwicklung von autonomen Fahrzeugen soll das Projekt *Self Driving Car* der Google Inc. betrachtet werden. Zunächst wurden in diesem Projekt seriennahe Fahrzeuge mit Sensorik ausgestattet und im öffentlichen Verkehr in

Nevada und Kalifornien betrieben [13], [59]. Obwohl es nur spärliche Informationen über die genutzte Technologie in den Fahrzeugen gibt, erscheint ein Einsatz ohne Sicherheitsfahrer bisher noch nicht möglich. Wie in [13] beschrieben, gibt es zahlreiche Situationen, die die Leistungsfähigkeit des Systems übersteigen. Der sichere Zustand bei diesen Fahrzeugen ist ebenfalls die Übernahme der Kontrolle durch den Fahrer. 2014 wurde ein Prototyp vorgestellt, der nicht mehr über Bedienelemente für den Fahrer verfügt und somit auf jeden Fall als vollautomatisiert nach [20] einzustufen ist, da es keine Möglichkeit zur Übersteuerung gibt. Dieses Fahrzeug wird jedoch bisher nicht im öffentlichen Straßenverkehr eingesetzt.

23.2.3 Zusammenfassung

Wie die betrachteten Projekte zeigen, gibt es bisher noch kein durchgängiges Sicherheitskonzept, das alle Anforderungen an eine Automatisierung von Fahrzeugen ohne Sicherheitsfahrer im öffentlichen Straßenverkehr erfüllt. In einigen der Projekte wurden jedoch leistungsfähige Sicherheitsfunktionen gezeigt, die verschiedene Situationen und Ereignisse abdecken. Nimmt man an, dass der sichere Zustand zukünftig entsprechend der „Adopted Regulation of the Department of Motor Vehicles“, Abschnitt 16.2 (d) aus Nevada erreicht werden soll, muss ein autonomes Fahrzeug zu jedem Zeitpunkt der Fahrt in der Lage sein, den fließenden Verkehr zu verlassen und am Straßenrand oder auf einem Seitenstreifen anzuhalten [39]. Dies würde Fahrstreifenwechsel erfordern, die wiederum von einer zuverlässig funktionierenden Umfeldwahrnehmung, Entscheidungsfindung und deren Umsetzung abhängen. Ein einfaches Anhalten, wie es in einigen der Projekte neben der Übergabe an den Sicherheitsfahrer gemacht wird, ist nicht ausreichend. Die Nutzung von einer Kombination aus den vorgestellten Ansätzen zur funktionalen Sicherheit erscheint daher notwendig – wahrscheinlich sind jedoch noch weitere Sicherheitsmaßnahmen zu ergreifen, mit denen eine höhere Zuverlässigkeit erreicht werden kann [39].

23.3 Sicherheitskonzepte aus anderen Disziplinen

Neben autonomen Fahrzeugen und Fahrerassistenzsystemen spielt die funktionale Sicherheit auch in anderen technischen Bereichen eine wichtige Rolle. Im Folgenden werden daher Sicherheitskonzepte aus weiteren Disziplinen vorgestellt und deren Anwendbarkeit auf autonome Fahrzeuge untersucht.

23.3.1 Schienenfahrzeuge

Schienenfahrzeuge werden bereits seit einigen Jahren automatisch betrieben. Im Personenverkehr ist dabei meist ein Zugführer vorhanden, der eine überwachende Aufgabe über-

nimmt [66]. Im Gegensatz zu den hier betrachteten autonomen Fahrzeugen werden Sicherheitsfunktionen häufig in die Infrastruktur integriert, beispielsweise werden Gleisbelegungen in Steuerzentralen koordiniert, und die überwachenden Komponenten sind in die Gleise integriert. Die Steuerungssysteme haben die Aufgabe, Streckenabschnitte immer nur mit einem Zug zu belegen, um Kollisionen zu vermeiden. Dies wird durch im Gleis verbaute Sensoren und Systeme (*waysidecentric*) wie z. B. Achszähler am Eingang und am Ausgang eines Streckenabschnitts realisiert [42]. Ist ein Abschnitt belegt, so werden die Signale entsprechend geschaltet, um eine Einfahrt zu verhindern. Die Kollisionsvermeidung ist daher vorrangig ein logistisches Problem, speziell der Verkehrsbetriebstechnologie. Die mechanische Querführung ohne Freiheitsgrad bei Schienenfahrzeugen reduziert die Komplexität der Situationen und Handlungsoptionen. Vereinfacht gesagt kommt es nur darauf an, dass Züge auf freien Gleissegmenten mit angemessener Geschwindigkeit fahren, um ein Entgleisen zu verhindern. Eine Überwachung der Strecke vor dem Zug ist aufgrund der langen Anhaltewege nicht mit Umfeldsensorik möglich. Dennoch verfügen Züge und Bahnen über Nothaltefunktionen, die von den Passagieren und dem Zugführer an Bord und in fahrerlosen Bahnen auch von extern ausgelöst werden können.

In fahrerlosen Zügen und Bahnen wird die Geschwindigkeit der Fahrt automatisch geregelt, und neben der Überwachung der Gleisbelegung durch die Infrastruktur verfügen die Systeme auch über Onboard-Mechanismen (*vehiclecentric*). Die Kommunikation zwischen Steuerzentrale und Fahrzeug erfolgt über Funktechnologien, genauso wie die Kommunikation zwischen Bahnsteigen und fahrerlosen U-Bahnen. Dadurch kann eine redundante Türüberwachung am Bahnsteig und in der Bahn genutzt werden, um Gefährdungen durch sich schließende Türen zu verhindern. Das *Communication Based Train Control* (CBTC) hat sich zu einem Standard entwickelt, der in zahlreichen Bahnsystemen weltweit eingesetzt wird [42].

In der Nürnberger U-Bahn RUBIN wird ein solches System zur automatisierten Zugführung eingesetzt. Auf den Bahnstrecken gibt es einen gemischten Verkehr von Bahnen mit und ohne Fahrer. Ein wesentlicher Bestandteil des Sicherheitskonzepts ist die Überwachung der Türen [38]. Hier werden Komponenten der automatischen Zugschutzsysteme (*Automatic Train Protection* (ATP)) und des automatischen Zugbetriebs (*Automatic Train Operation* (ATO)) eingesetzt, die in stationäre und Onboard-Komponenten unterteilt werden. Mit ATP wird die Geschwindigkeit unterhalb existierender Begrenzungen gehalten, und es werden Sicherheitsstopps und Nothalte ausgelöst. Das System muss daher die Anforderungen an das Sicherheitsintegritätslevel 4 (höchste Sicherheit) nach der europäischen Norm IEC 50128:2011 erfüllen [29]. Die dafür notwendige Hard- und Software ist in Relation zu den hohen Kosten von Schienenfahrzeugen im Vergleich zu Kraftfahrzeugen relativ günstig.

23.3.2 Rein elektrische Ansteuerung von Aktoren (X-by-Wire)

Bei autonomen Fahrzeugen erfolgt die Ansteuerung der Aktoren über elektrische Signale. Gas, Bremse, Lenkung und Sonderfunktionen werden über Steuergeräte angesteuert. Die-

se X-by-Wire-Technologie ist bisher noch nicht vollständig in Serienfahrzeugen erhältlich. Das elektronische Gaspedal, die elektromechanische Lenkung und das elektrohydraulische Bremssystem gibt es zwar schon seit einigen Jahren. Jedoch verfügen Lenkung und Bremse immer noch über einen mechanischen/hydraulischen Durchgriff, zumeist permanent und in eher seltenen Fällen als Rückfallebene, falls das elektrische System ausfällt.¹ Der Fahrer kann das Fahrzeug dadurch auch ohne Elektronik kontrollieren.

Für autonome Fahrzeuge muss die Aktorik daher mehrfach redundant angesteuert werden, wie das beispielsweise in Flugzeugen erfolgt. Sowohl die Kommunikationssysteme zwischen Bedienelementen, Steuergeräten und Aktoren als auch die Bedienelemente, Steuergeräte und Aktoren (inklusive der Energieversorgung) selbst werden hier mehrfach verbaut, sodass im Fehlerfall auf die redundanten Systeme zurückgegriffen werden kann [3]. In [67] wird ein dreifach-redundantes Steuerungssystem für ein Boeing 777-Passagierflugzeug vorgestellt. Jede sicherheitsrelevante Komponente des Flugzeugkontrollsystems wird auf drei unterschiedliche Arten redundant umgesetzt, um eine hohe Verfügbarkeit der Ansteuerung durch einen Piloten oder den Autopiloten zu realisieren. Aufgrund der Kritikalität der Flugzeugführung sind in Passagierflugzeugen neben dem Autopiloten zwei menschliche Piloten an Bord vorgeschrieben [15].

Die in Flugzeugen eingesetzten Architekturmuster und auch die Hard- und Software zur Realisierung erscheinen auch für Fahrzeuge technisch anwendbar. In Flugzeugen spielen die hohen Kosten solcher redundanter Systeme aufgrund der hohen Gesamtkosten des Flugzeugs selbst nur eine geringe Rolle. Für Fahrzeuge wären bei einer analogen Anwendung von dreifacher Redundanz jedoch der dreifache Entwicklungsaufwand und die dreifache Hardware im Vergleich zu heutigen Systemen im Fahrzeug erforderlich. Es bleibt allerdings offen, ob in Fahrzeugen tatsächlich eine dreifache Redundanz der Systeme erforderlich wäre.

Im Flugverkehr werden die Flugrouten durch eine zentrale Luftverkehrskontrolle vorgegeben, und die Autopiloten halten die Flugzeuge auf den vorgegebenen Kursen. Ein Autopilot im Flugzeug lässt sich mit einem teilautomatisierten Fahrerassistenzsystem vergleichen, da die Piloten die Aufgabe haben, das System zu überwachen. In unbemannten Flugzeugen entfällt diese Überwachung durch Piloten, und die Anforderungen an das Flugzeugführungssystem steigen. Durch Flugrouten, die nur über dünnbesiedelte Gebiete gelegt werden, sollen Risiken reduziert werden. Da keine Personen an Bord sind, ist ein Absturz im freien Feld durchaus möglich, da niemand dabei verletzt wird [34].

23.3.3 Robotik

Mobile Roboter können sich selbst und ihre Umgebung durch Kollisionen mit Objekten, Personen und weiteren Lebewesen und durch Übersehen von Absätzen, Abgründen, Stufen

¹ Der Fahrzeughersteller Nissan hat 2012 eine Lenkung vorgestellt, die im Fehlerfall eine mechanische Verbindung über eine Kupplung herstellt.

etc. gefährden [1], [10], [18]. Automatisierte Manipulatoren, die entweder stationär oder auf mobilen Plattformen eingesetzt werden, können Menschen gefährden, indem sie ihre Gelenke bewegen und mit den Menschen kollidieren oder durch die Werkzeuge, die sie einsetzen, verletzen. Sowohl für mobile Roboter als auch für Manipulatoren ist der sichere Zustand ein Stopp aller Manipulatoren in der aktuellen Position bzw. ein Anhalten [5]. In den meisten Fällen gilt: Je schneller dies geschieht, umso niedriger ist die Gefährdung, die von dem Roboter für seine Umwelt ausgeht. Ausnahmen sind Werkzeuge und Manipulatoren, wie z. B. Hände und Greifer, die einen Druck ausüben können. Ein Stopp der Aktoren könnte hier einen Druck erhalten, der zu Verletzungen und Beschädigungen führen kann. Wird ein Roboter für komplexere Tätigkeiten eingesetzt, so können daraus Verletzungen und Schäden entstehen, die zwar nicht direkt durch die Bewegung des Roboters verursacht werden, aber durch die Folgen seiner Aktionen. Beispielweise kann es zu Bränden kommen, wenn ein Bügelroboter abrupt stehen bleibt oder Gefahrgut von einem mobilen Roboter transportiert wird [64].

In [64] und [65] wird eine sicherheitsgetriebene Architektur für Steuerungssysteme von Robotern vorgestellt, die eine Sicherheitsschicht enthält. Diese soll einen Roboter stets in einen sicheren Zustand überführen. Die sicheren Zustände sind abhängig von den Funktionen, die ein Roboter erfüllen soll. Diese können sehr vielfältig sein, und daher wird in [64] und [65] ein Regelsatz (*safety policies*) vorgeschlagen, der übergeordnete Regeln enthält, die einen sicheren Betrieb eines Roboters ermöglichen. Es ist vorstellbar, dass ein Roboter unerwartete Lösungswege für ein Problem abhängig von seiner Entscheidungsfreiheit und seinen grundlegenden Fähigkeiten findet und es dadurch zu gefährlichen Situationen kommen kann. Wie in [9] beschrieben, kann dies bei der häufig angewendeten Subsumptionsarchitektur erfolgen. Übertragen auf autonome Fahrzeuge bedeutet dies, dass zwar Fahrentscheidungen nach verschiedenen Kriterien wie z. B. der Straßenverkehrsordnung, effizienter Fahrweise und Komfort getroffen werden können, aber stets eine Kollisionsvermeidung aktiv wäre, die als übergeordnete Instanz eingreifen könnte.

23.3.4 Kraftwerkstechnik

Kernkraftwerke gelten weithin als besonderes Risiko, da bei Störfällen hohe Schäden für die Umwelt entstehen können. Die dort eingesetzten Steuer- und Regelungssysteme müssen daher die höchsten Sicherheitsanforderungen erfüllen, um einen Betrieb auch nach Naturkatastrophen, terroristischen Anschlägen und internen technischen Fehlern zu ermöglichen. Da bei Kernkraftwerken eine sofortige Abschaltung nicht möglich ist und die Brennelemente auch nach ihrem Einsatz im Reaktor weiterhin aktiv sind und gekühlt werden müssen, sind mehrfach redundante Systeme vor allem zur Kühlung vorgeschrieben.

Die Sicherheit eines Kernkraftwerks hängt maßgeblich davon ab, wie vollständig und fehlerfrei die Steuerungs- und Kontrollsysteme spezifiziert und entwickelt werden. Die

Einbeziehung der Menge der möglichen Situationen und Ereignisse spielt dabei eine wesentliche Rolle, da vor allem Kettenreaktionen und Mehrfachfehler zu einer Gefährdung führen können. Beispielsweise befand sich das Kernkraftwerk Fukushima Daiichi in Fukushima, Japan, nach dem Erdbeben in einem Fail-safe-Zustand und alle Sicherheitssysteme wurden automatisch korrekt aktiviert. Nach dem Auftreffen des Tsunamis wurden jedoch Teile der redundanten Sicherheitssysteme, vor allem der Notstromaggregate, beschädigt. Im Nachhinein betrachtet liegt der Fehler nicht am Versagen der Sicherheitsfunktionen, sondern an der fehlerhaften Spezifikation [63].

Für autonome Fahrzeuge lässt sich daraus folgern, dass die zahlreichen Ereignisse und Kombinationen von Ereignissen und Fehlerquellen bereits bei der Spezifikation berücksichtigt werden müssen. Möglicherweise ist daher eine Standardisierung für die Ermittlung der Anforderungen, vergleichbar mit Kernkraftwerken, notwendig. Bei deren Entwicklung spielt die Sicherheit bereits in der Designphase eine tragende Rolle und steht im Mittelpunkt des Entwicklungsprozesses (*safety by design*, [26]).

23.4 Sichere Zustände in den Use-Cases

Ein wichtiges Kriterium beim Betrieb eines autonomen Fahrzeugs ist, ob sich Passagiere an Bord des autonomen Fahrzeugs befinden oder nicht. So muss beispielsweise bei der Wahl des Abstellorts nicht auf das sicher mögliche Verlassen des Fahrzeugs von Passagieren, wohl aber auf die anderen Verkehrsteilnehmer geachtet werden. Außerdem spielt der Fahrkomfort keine Rolle, wodurch eine andere Fahrweise möglich wird, die den Komfort ignoriert. Sind jedoch Passagiere an Bord, so muss das Fahrzeugführungssystem die Aufgaben eines menschlichen Fahrers übernehmen. Dazu gehört auch die Überwachung der Passagiere, beispielsweise, ob diese angegurtet auf den Passagierplätzen sitzen oder sich riskant verhalten. Es kann immer zu Kollisionen mit anderen Verkehrsteilnehmern kommen, und so sind Mechanismen der passiven Sicherheit wie z. B. Sicherheitsgurte und Airbags auch in autonomen Fahrzeugen erforderlich. Gleiches gilt für die Sicherung von Ladung, besonders für Gefahrgut.

Im folgenden Abschnitt werden die vier für das Projekt definierten Use-Cases untersucht und jeweils die Eigenschaften des sicheren Zustands herausgearbeitet.

23.4.1 Use-Case 1: Autobahnautomat mit Verfügbarkeitsfahrer – Autobahnpilot

Durch die Beschränkung des Einsatzes auf Autobahnen ist auch die Anzahl der möglichen und wahrscheinlichen Situationen im Vergleich zum städtischen Straßenverkehr geringer. Der Verfügbarkeitsfahrer steht grundsätzlich als Rückfallebene zur Verfügung, und er ist in der Lage, die Kontrolle jederzeit nach eigenem Ermessen zu übernehmen. Das Fahrzeug ist in den folgenden Situationen in einem sicheren Zustand:

1. Das Fahrzeug steht still. Von einem stehenden Fahrzeug geht aktiv keine unmittelbare Gefahr aus (vgl. [6] und [27]). Die Sicherheit für Passagiere und andere Verkehrsteilnehmer hängt jedoch vom Standort des Fahrzeugs ab:
 - *Fahrestreifen auf einer Autobahn*: Aufgrund des Verfügbarkeitsfahrers ist eine manuelle Weiterfahrt mit hoher Wahrscheinlichkeit möglich. Falls eine manuelle Weiterfahrt nicht mehr möglich ist, kann ein stehendes Fahrzeug wie in den Fehlercodes F5 und F6 nach [6] (s. Tab. 23.1) auf einem Fahrestreifen einer Autobahn zu gefährlichen Situationen führen. Einerseits weil das Fahrzeug übersehen oder zu spät gesehen werden könnte, andererseits weil die Passagiere das Fahrzeug eventuell verlassen müssen. Eine weitere Gefährdung kann entstehen, falls das automatisierte Fahrzeug beispielsweise eine Rettungsgasse im Stau blockiert. Ist eine manuelle Fahrt nicht mehr möglich, so obliegt es dem Verfügbarkeitsfahrer, das Fahrzeug entsprechend den geltenden Gesetze abzusichern, z. B. nach §15 StVO [11].
 - *Seitenstreifen auf einer Autobahn oder Fahrbahnrand einer Autobahn bei fehlendem Seitenstreifen oder Parkplatz, Nothaltebucht oder ähnlicher Standort*: Bleibt ein automatisiertes Fahrzeug auf dem Seitenstreifen einer Autobahn, am Fahrbahnrand oder an einem ähnlichen Standort liegen, kann der Verfügbarkeitsfahrer das Fahrzeug möglicherweise manuell weiterfahren, oder er muss das Fahrzeug entsprechend den geltenden Gesetze absichern (vgl. Fehlercodes F2, F3 und F4 in [6]).
2. Das Fahrzeug fährt auf einem Fahrestreifen mit den vorgeschriebenen oder aufgrund der Leistungsfähigkeit des Fahrzeugs auch größeren Sicherheitsabständen zu anderen Verkehrsteilnehmern und mindestens mit der minimal vorgeschriebenen Geschwindigkeit bzw. höchstens mit der maximal erlaubten oder aufgrund der Leistungsfähigkeit des Fahrzeugs auch maximal möglichen Geschwindigkeit. Das Fahrzeug kennt seine eigene Leistungsfähigkeit und kann daher Systemgrenzen selbstständig erkennen.
3. Das Fahrzeugführungssystem reagiert mit einer Aktion (s. Abschn. 23.5) auf ein Ereignis (s. Abschn. 23.4), um das aktuelle Risiko zu verringern. Dadurch soll ein sicherer Zustand erreicht oder der sichere Zustand erhalten werden – beispielsweise durch eine Übergabe an den Verfügbarkeitsfahrer.

23.4.2 Use-Case 2: Autonomes Valet-Parken

In diesem Use-Case ist die Maximalgeschwindigkeit des Fahrzeugs nur gering (ca. 30 km/h). Dadurch ist die resultierende Energie, die im Notfall abgebremst werden muss, deutlich geringer als die üblicherweise erlaubten 50 km/h in deutschen Städten. Eine Übergabe an einen Verfügbarkeitsfahrer ist in diesem Use-Case nicht möglich, da das Fahrzeug fahrerlos betrieben werden kann. Die Sicherheit von Passagieren spielt keine Rolle, da das Fahrzeug ohne Passagiere fährt. Die Fahrtroute muss so geplant werden, dass keine Straßen befahren werden, die das Fahrzeug nicht beherrscht, beispielsweise Straßen mit Bahnübergängen.

In folgenden Situationen ist das Fahrzeug in einem sicheren Betriebszustand:

1. Das Fahrzeug steht still: Der Standort des liegen gebliebenen Fahrzeugs ist relevant, da das Fahrzeug ein gefährliches Hindernis für andere Fahrzeuge sein kann und Rettungsfahrzeuge und Rettungswege blockieren könnte. Die Absicherung des liegen gebliebenen Fahrzeugs ist erschwert, da kein Mensch an Bord ist, der dies übernehmen kann. Nur die am Fahrzeug angebrachte Beleuchtung erscheint zur Absicherung nutzbar. In vielen Ländern gibt es spezielle Vorschriften zur Absicherung eines liegen gebliebenen Fahrzeugs, beispielweise durch ein Warndreieck, das einige Meter hinter dem Fahrzeug aufgestellt werden muss. Es ist schwer vorstellbar, dass dies von einem autonomen Fahrzeug selbstständig erledigt wird. Daraus folgt, dass eine oder mehrere Personen dafür verantwortlich sind. Das Fahrzeug muss also entweder ständig überwacht werden oder von sich aus Hilfe anfordern, falls es zum Anhalten gezwungen ist.
2. Das Fahrzeug fährt auf einem Fahrstreifen, wie in Use-Case 1 beschrieben. Es ist jedoch nicht möglich, an einen Verfügbarkeitsfahrer zu übergeben, da keiner an Bord ist. Eine Möglichkeit besteht, dass das Fahrzeug anhält und so einen sicheren Zustand erreicht. Es ist auch vorstellbar, dass im Fehlerfall während der Fahrt an einen Teleoperator übergeben wird, der das Fahrzeug ferngesteuert an einen sicheren Standort fahren kann.
3. Das Fahrzeug durchfährt eine Kreuzung oder einen Kreisverkehr, oder es biegt ab. Beherrscht das Fahrzeug die Situation und die aktuell geltenden Vorfahrtregeln, so sind diese Manöver sicher. Erreicht das Fahrzeug dabei seine Systemgrenzen, so kann es mit reduzierter Geschwindigkeit und Signalisierung für die anderen Verkehrsteilnehmer weiterfahren.
4. Das Fahrzeug befindet sich auf einem Parkplatz. Durch die geringen Relativgeschwindigkeiten und den verhältnismäßig geringen Verkehrsfluss sind die Anforderungen hier niedriger und das Betriebsrisiko ist geringer.

Die wesentliche Herausforderung ist der fehlende Verfügbarkeitsfahrer. Bei Ereignissen, die das Risiko erhöhen, kann nicht an den Verfügbarkeitsfahrer übergeben werden, und der Stillstand birgt in vielen Situationen ein hohes Risiko, da das Fahrzeug nicht sofort manuell bewegt werden kann. Eine Lösung könnte das teleoperierte Fahren sein, bei dem eine Kommunikationsverbindung zum Fahrzeug besteht, die zur Meldung eines Problems des Fahrzeugs und zur Fernsteuerung des Fahrzeugs genutzt wird. Ist ein Anhalten erforderlich, so muss dies den anderen Verkehrsteilnehmern entsprechend signalisiert werden. Eine Absicherung des Fahrzeugs durch den Verfügbarkeitsfahrer ist hier nicht möglich.

Das Blockieren von Rettungsfahrzeugen und Rettungswegen auf einstreifigen Straßen und bei Zufahrten für Rettungsfahrzeuge vor Gebäuden und anderen Einrichtungen, wie z. B. öffentliche Plätze, stellt einen Sonderfall dar. Das Blockieren kann dazu führen, dass Rettungsaktionen verzögert und erschwert werden. Dies ist einerseits gesetzlich verboten, andererseits ein wesentlicher ethischer Aspekt. Untersuchungen, die die Häufigkeit solcher Situationen belegen, sind dem Autor nicht bekannt. Daher kann hier keine Aussage getrof-

fen werden, ob dieser Fall explizit berücksichtigt werden muss oder nicht. Nicht automatisierte Fahrzeuge können zwar ebenfalls liegen bleiben, es ist durch den vorhandenen Fahrer jedoch einfacher, das Fahrzeug schnell und unkompliziert aus dem Weg zu fahren oder zu schieben.

23.4.3 Use-Case 3: Vollautomat mit Verfügbarkeitsfahrer

Sicherheit und Risiko dieses Use-Case sind einer Kombination der Use-Cases 1 und 2 sehr ähnlich. Durch den vorhandenen Verfügbarkeitsfahrer ist es möglich, die Kontrolle an diesen abzugeben. Er kann auch die Absicherung des Fahrzeugs übernehmen, falls dieses liegen bleibt.

Auch die notwendigen Fahrmanöver und die Situationen decken sich mit den Use-Cases 1 und 2. Zusätzlich wird das Fahrzeug auch auf Überlandverbindungen eingesetzt. Die maximale Geschwindigkeit ist in diesem Use-Case auf 240 km/h beschränkt. Dadurch sind praktisch alle Geschwindigkeiten denkbar, jedoch muss die Maximalgeschwindigkeit immer so gewählt werden, dass diese innerhalb der Leistungsfähigkeit des Fahrzeugführungssystems liegt und das Risiko entsprechend reduziert ist.

Für den sicheren Zustand gelten die gleichen Bedingungen wie in den Use-Cases 1 und 2.

23.4.4 Use-Case 4: Vehicle-on-Demand

(Sicherheits-)Technisch ist dieser Use-Case der anspruchsvollste. Das Fahrzeug muss mit allen Situationen zurechtkommen, mit denen auch ein Mensch zurechtkommen muss. Das Risiko muss stets unterhalb einer für Passagiere und andere Verkehrsteilnehmer zumutbaren Schwelle liegen. Sowohl die Fahrmanöver als auch die Bedingungen für den sicheren Zustand können unter Berücksichtigung des fehlenden Verfügbarkeitsfahrers aus den Use-Cases 1, 2 und 3 übernommen werden.

Das Fahrzeug befindet sich unter den folgenden Bedingungen in einem sicheren Zustand:

1. Das Fahrzeug steht still wie in den Use-Cases 1, 2 und 3. In jeder Situation ist das Fahrzeug auf Hilfe von außen angewiesen. Neben möglichen Passagieren sind weitere Personen involviert, die über den Zustand des Fahrzeugs informiert sein und auf Probleme des Fahrzeugs reagieren müssen.
2. Das Fahrzeug fährt auf einem Fahrstreifen wie in den Use-Cases 1, 2 und 3. Aus der Fahrt heraus muss bei einem risikoerhöhenden Ereignis selbstständig ein sicherer Zustand erhalten bzw. erreicht werden.

Durch die Verfügbarkeit auf Abruf und die universelle Nutzbarkeit muss das Vehicle-on-Demand mit allen Situationen im Straßenverkehr zurechtkommen. Die sicherheitsrelevan-

ten Ereignisse, die eine Reaktion des Fahrzeugs erfordern, werden in Abschn. 23.5 näher beschrieben.

23.4.5 Zusammenfassung

Die Betrachtung der vier Use-Cases hat ergeben, dass die größten Herausforderungen für den sicheren Zustand durch hohe Relativgeschwindigkeiten, das Fehlen eines Verfügbarkeitsfahrers und das Blockieren von Rettungsfahrzeugen und -wegen entstehen. Aus ihrer Betrachtung lassen sich folgende Sicherheitsanforderungen an das Fahrzeug ableiten:

- Ein autonomes Fahrzeug muss seine eigene aktuelle Leistungsfähigkeit kennen.
- Ein autonomes Fahrzeug muss seine eigenen aktuellen funktionalen Grenzen abhängig von der aktuellen Situation kennen.
- Ein autonomes Fahrzeug muss stets in einem Zustand betrieben werden, in dem das Risiko für Passagiere und weitere Verkehrsteilnehmer zumutbar ist.
- Ein Fahrzeug, das auf einem Seitenstreifen oder am Fahrbahnrand steht und den Verkehr nicht blockiert, ist in einem sicheren Zustand.
- Ein Fahrzeug, das auf einem Fahrstreifen steht, ist nur in einem sicheren Zustand, falls alle folgenden Bedingungen zutreffen:
 - Die Relativgeschwindigkeit zu weiteren Verkehrsteilnehmern ist unterhalb eines noch zu definierenden Maximums.
 - Das stehende Fahrzeug blockiert keine Rettungsfahrzeuge oder Rettungswege.
 - Ein Verfügbarkeitsfahrer oder ein Teleoperator kann das Fahrzeug in kurzer Zeit von diesem Standort entfernen.
 - Ein Verfügbarkeitsfahrer kann das Fahrzeug absichern.
- Ein Fahrzeug, das sich mit hohem Risiko bewegt oder an einer gefährlichen Stelle stehen geblieben ist, muss einen Notruf absetzen und Hilfe anfordern können.

23.5 Sicherheitsrelevante Ereignisse

Im Straßenverkehr können verschiedene Ereignisse auftreten, die das Risiko in der aktuellen Situation und in der zukünftigen Entwicklung der Situation beeinflussen. Einerseits verringern technische Defekte und Fehler im Fahrzeugführungssystem die eigene Leistungsfähigkeit, andererseits erhöhen Veränderungen der Umweltbedingungen, Situationen, die das Fahrzeugführungssystem überfordern, fehlerhaftes Verhalten der anderen Verkehrsteilnehmer und Ereignisse der höheren Gewalt die Anforderungen an das Fahrzeugführungssystem. Besonders eine Kombination aus reduzierten Fähigkeiten und erhöhten Anforderungen führt zu einem größeren Risiko.

Defekte und technische Fehler am Fahrzeug und am Fahrzeugführungssystem können unvermittelt auftreten und sind daher schwer vorherzusehen. Neben mechanischen Defek-

ten am Fahrzeug können Defekte und Entwicklungsfehler im Fahrzeugführungssystem zu einer verringerten Leistungsfähigkeit führen (vgl. [16]). Ungünstige Licht- und Wetterverhältnisse erhöhen die Anforderungen an die Robustheit der eingesetzten Sensorik zur Umfeldwahrnehmung. Außerdem führen ungünstige Wetterbedingungen zu schlechteren Straßenverhältnissen. Diese wirken sich direkt auf die Fahrdynamik aus. Aufgrund der Komplexität des Straßenverkehrs und der offenen Menge an möglichen Situationen ist es wahrscheinlich, dass bei der Entwicklung eines Fahrzeugführungssystems nicht alle Situationen berücksichtigt werden können. Gerät das Fahrzeug in eine Situation, die mit der bestehenden Software nicht gelöst werden kann, hat dies einen direkten Einfluss auf das Risiko.

Eine große Herausforderung ist das Erkennen der eigenen Leistungsfähigkeit und der Systemgrenzen in solchen Situationen. Das Verhalten der anderen Verkehrsteilnehmer ist nicht immer regelkonform, und so kann es vorkommen, dass sich diese gefährdend verhalten. In manchen Situationen könnte der Betrieb eines automatisierten Fahrzeugs nicht sicher sein, weil sich andere Verkehrsteilnehmer gefährlich verhalten. Denkbar ist sogar, dass dies mutwillig geschieht, falls das automatisierte Fahrzeug als solches erkannt wird. Auch durch höhere Gewalt kann das Risiko des Betriebs zunehmen, beispielsweise durch Erdbeben und Flutwellen oder durch Sonnenstürme, die zu einer Störung von genutzten Systemen wie eines globalen Navigationssatellitensystems oder der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation führen [12]. Bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen nach ISO 26262 wurden solche Ereignisse nicht berücksichtigt [30]. Wie dies bei autonomen Fahrzeugen gehandhabt wird, ist bisher noch offen [61].

23.6 Aktionen zur Reduzierung des Risikos

Unter der Annahme, dass ein automatisiertes Fahrzeug stets mit einem zumutbaren Risiko betrieben werden und gleichzeitig einen möglichst hohen Funktionsumfang bereitstellen soll, sind als Reaktion auf sicherheitsrelevante Ereignisse Aktionen auszuführen, die das Risiko auf einen zumutbaren Wert senken oder diesen erhalten und gleichzeitig einen hohen Funktionsumfang ermöglichen. Eine Reduzierung der Fahrgeschwindigkeit, eine Erhöhung der Sicherheitsabstände, eine sicherheitsoptimierte Planung von Fahrmanövern, das Verbot bestimmter Fahrmanöver und die Ausführung von Sicherheitsfahrmanövern sind möglich. Das zugrundeliegende Prinzip der funktionalen Degradation (*graceful degradation*) stammt aus der Biologie und wurde beispielsweise in [40] vorgestellt. In [68] wird u. a. ein Überblick über die Anwendungen der funktionalen Degradation in der Luft- und Raumfahrt, der Kraftwerkstechnologie und weiteren Forschungsbereichen gegeben. Treten Fehler in einem System auf oder sind die Ressourcen eingeschränkt, so werden die „lebenswichtigen“ Prozesse erhalten und weniger wichtige Prozesse reduziert oder beendet. Beispielsweise kann bei einem eingeschränkten Sichtfeld die Geschwindigkeit des Fahrzeugs reduziert werden. Unter bestimmten Bedingungen können jedoch auch diese Aktionen nicht zu einer Reduzierung des Risikos auf einen zumutbaren Wert führen, sodass ein An-

halten des Fahrzeugs [25], [46] oder, falls dies ebenso zu riskant ist, ein Verlassen des Straßenverkehrs notwendig werden.

Bei der funktionalen Degradation ist es nicht nur notwendig, einen sicheren Zustand zu erreichen bzw. zu erhalten, sondern auch die Leistungsfähigkeit zu erhöhen, indem Mechanismen zur Selbstheilung und Rekonfiguration angewendet werden. In technischen Systemen ist der Neustart von Komponenten eine weitverbreitete Aktion zur Wiederherstellung der Leistungsfähigkeit [22], [44]. Ein Neustart benötigt in der Regel einige Zeit, und es kann je nach Systemstruktur vorkommen, dass ein Neustart einer Komponente auch den Neustart oder zumindest eine erneute Initialisierung anderer Komponenten nach sich zieht. Daher werden sicherheitskritische Komponenten häufig (diversitär) redundant ausgelegt (vgl. [3], [28]).

Neben der Redundanz gibt es auch für einzelne Komponenten Möglichkeiten zur Wiederherstellung der Funktionalität. Für Sensoren und Aktoren bietet sich die Rekalibrierung an, mit deren Hilfe Messwerte bzw. die Umsetzung von Stellwerten abhängig von der aktuellen Situation verbessert werden können. Für das Gesamtsystem können zudem Rekonfigurationsmechanismen genutzt werden, die einen sicheren Betrieb auch nach risikoerhöhenden Ereignissen erlauben [33].

Eine Herausforderung stellt das Erkennen von riskanten Situationen dar. Externe Ereignisse müssen über die Umfeldwahrnehmung erfasst und richtig interpretiert werden. Technische Fehler am Fahrzeug und im Fahrzeugführungssystem müssen jedoch ebenfalls erkannt werden. Ein Fahrer beobachtet Warn- und Kontrollleuchten und nimmt Veränderungen am Fahrzeug, beispielsweise durch technische Defekte, über seine Sinne wahr. In ein autonomes Fahrzeug müssen daher Sensoren und Funktionen integriert werden, die Defekte und Fehler erkennen und anhand ihrer Schwere die aktuelle und zukünftige Leistungsfähigkeit und den möglichen Funktionsumfang ermitteln. Die zu erwartende Komplexität eines Fahrzeugs mit Fahrzeugführungssystem führt zu einer hohen Anzahl an Messwerten. Als Ergebnis wird eine Selbstrepräsentation des Fahrzeugs erstellt, die genutzt wird, um abhängig von der Situation und der Leistungsfähigkeit zu einer Bewertung des aktuellen Risikos zu gelangen. Darauf basieren dann die o.g. Sicherheitsaktionen [46].

23.7 Antizipation von Degradationssituationen

Aufgrund der hohen Dynamik des Straßenverkehrs und der Eigenschaften von elektrischen und elektronischen Systemen können sicherheitsrelevante Ereignisse in Sekundenbruchteilen auftreten und erfordern daher eine schnelle Reaktion des Systems. Besser ist es jedoch, wenn sich Situationen, die ein erhöhtes Risiko aufweisen, vorhersehen lassen oder zumindest bei der Planung von Fahrmanövern berücksichtigt werden. Das *vorausschauende Fahren* des Menschen kann in einem Fahrzeugführungssystem noch umfangreicher implementiert werden, da beispielsweise die Überwachung und Nutzung von zahlreichen Messwerten aus dem Fahrzeug direkt erfolgen.

Die gesammelten Messwerte müssen für eine Vorhersage der Entwicklung der Situation überwacht und gespeichert werden. Anhand von umfangreichen Datenanalysen könnten sich anbahnende Fehler erkannt werden. Bereits eine Erkennung von Schwierigkeiten einige Zehntelsekunden vor einem Ereignis kann zu einer sichereren Reaktion führen. Ein notwendiges Bremsmanöver, das beispielweise 0,3 Sekunden eher erkannt und ausgelöst wird, kann den Anhalteweg bei einer Fahrt mit 50 km/h um 4,2 Meter verkürzen.

Weiteres Potenzial zur Erhöhung der Sicherheit liefern Kommunikationsmöglichkeiten mit der Infrastruktur und weiteren Fahrzeugen. Je eher Informationen über Gefahren vorliegen, umso eher kann auf diese reagiert werden, beispielweise bei Straßenschäden, Verschmutzung und Glätte, bei vorausliegenden Stauenden oder bei Notbremsmanövern von vorausfahrenden Fahrzeugen.

23.8 Dilemma-Situationen

In manchen Fällen kann eine Verkettung von Ereignissen zu einer Situation führen, die nicht ohne Personenschaden lösbar ist. Ein automatisiertes Fahrzeug muss in diesen Dilemma-Situationen innerhalb kürzester Zeit eine mögliche Handlungsoption auswählen, die zwar zu einem Personenschaden führt, jedoch den minimalen Schaden hervorruft. Mögliche Sachschäden und Verstöße gegen geltende Gesetze sind dabei ebenfalls denkbar, haben aber eine geringere Priorität. Die Anzahl der eigenen Passagiere und die Art und Dynamik der anderen Verkehrsteilnehmer müssen unter möglichen Unsicherheiten berücksichtigt werden. Die Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmern ist hier besonders wichtig und kann helfen, solche Situationen mit dem minimalen Personenschaden zu lösen.² Eine detaillierte ethische Diskussion zu Dilemma-Situationen findet sich in Kap. 4 dieses Buches. Im Folgenden werden daher nur technische Aspekte betrachtet.

Abbildung 23.1 zeigt zwei Situationen. Die erste ist kollisionsfrei lösbar. Die zweite kann zu einem Dilemma führen. Zu Beginn der ersten Situation fährt das Fahrzeug auf einem Fahrstreifen, und am Straßenrand sind weitere Fahrzeuge geparkt. Zwischen diesen tritt unerwartet und schwer zu erkennen eine Person auf den Fahrstreifen. Es gibt nun mehrere Möglichkeiten, wie das Fahrzeug reagieren kann, um eine Kollision mit dem Fußgänger zu vermeiden. In Option 1 kann das Fahrzeug bremsen und vor dem Fußgänger anhalten. In Option 2 kann das Fahrzeug auf den Nachbar-Fahrstreifen ausweichen und eine Kollision verhindern. Dabei ist ein Überfahren der durchgehenden Linie zwischen den Fahrstreifen erforderlich. Dies ist ein Verstoß gegen die StVO.

In der zweiten Situation fährt ein entgegenkommendes Fahrzeug auf dem zweiten Fahrstreifen. Nimmt man an, dass ein Bremsmanöver nicht mehr zu einer Verhinderung der Kollision mit dem Fußgänger führt, befindet sich das autonome Fahrzeug in einem Dilemma:

² Das DFG-Schwerpunktprogramm „Kooperativ interagierende Fahrzeuge“ wird dieses Thema in den nächsten Jahren ebenfalls untersuchen.

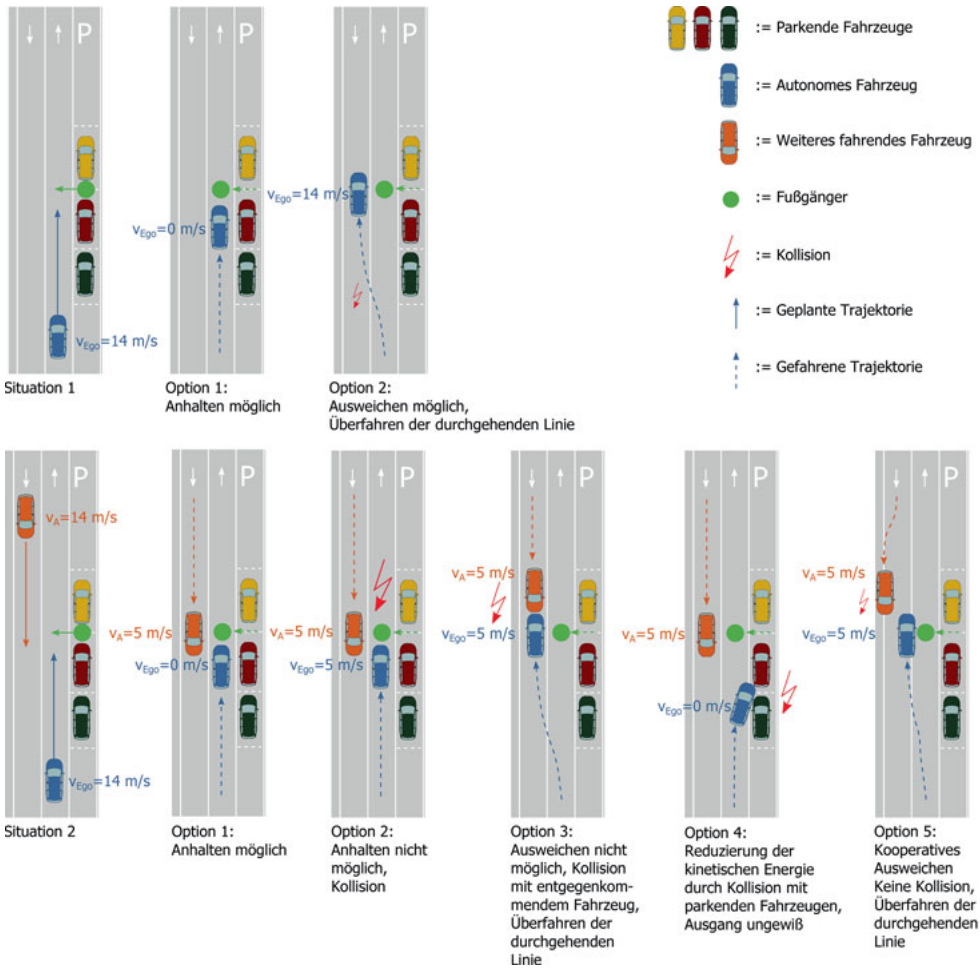


Abb. 23.1 Zwei Situationen, die zu einem Dilemma führen können

Mit dem Fußgänger zu kollidieren, kann schwere Verletzungen bei diesem hervorrufen (Option 2). Ausweichen auf den Nachbar-Fahrbahnstreifen führt zu einer Kollision mit dem entgegenkommenden Fahrzeug, und möglicherweise kann dadurch auch der Fußgänger verletzt werden (Option 3). Eine Kollision mit den parkenden Fahrzeugen zur Reduzierung der eigenen Geschwindigkeit ist ebenfalls denkbar (Option 4), jedoch ist die Unsicherheit, ob dadurch der Fußgänger verschont bleibt, sehr groß. Für solche Situationen ist daher auch die Implementierung von ethischen Grundsätzen in der Software zur Entscheidungsfindung innerhalb des Fahrzeugführungssystems erforderlich.

Eine Lösung zumindest dieses Problems könnte die Anwendung von Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation zwischen dem autonomen und dem entgegenkommenden Fahrzeug sein. Die beiden Fahrzeuge könnten gemeinsam eine Lösung finden, die dazu führt, dass das entgegenkommende Fahrzeug an den Fahrbahnrand ausweicht und das autonome

Fahrzeug zwischen entgegenkommendem Fahrzeug und Fußgänger kollisionsfrei passieren kann (Option 5). Beide Fahrzeuge würden dabei gegen die StVO verstoßen, da beide eine durchgehende Linie überfahren müssen.

Dennoch muss auch der Betrieb ohne Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmern und der Infrastruktur möglich sein, da es unwahrscheinlich ist, dass diese Kommunikationsmöglichkeiten flächendeckend und mit allen Verkehrsteilnehmern zur Verfügung stehen.

Die Fahrzeugführung muss daher auf der bordeigenen Sensorik möglich sein. Dieser *bordautonome Betrieb* (vgl. [36]) stellt einerseits die höchsten Anforderungen an das Fahrzeugführungssystem, andererseits aktuell die einzige Möglichkeit zu einem Einsatz im Straßenverkehr dar. Dies schränkt besonders die Möglichkeiten in gefährlichen Situationen und Dilemma-Situationen ein und erhöht die Unsicherheit bei der Wahrnehmung von Situationen. Auch die Signalisierung anderer Verkehrsteilnehmer ist nur durch optische und akustische Signale möglich.

23.9 Zusammenfassung

Bei den aktuellen Entwicklungen von Fahrerassistenzsystemen und in verwandten Entwicklungs- und Forschungsbereichen gibt es eine Vielzahl von Methoden, die auch bei der Entwicklung autonomer Fahrzeuge eingesetzt werden können und möglicherweise müssen. Aufgrund der Vielfalt der Technologien greifen diese an verschiedenen Stellen im Entwicklungsprozess und im zu entwickelnden System an und können zur Sicherheit autonomer Fahrzeuge beitragen.

Zunächst muss eine Metrik gefunden werden, mit der das Betriebsrisiko von autonomen Fahrzeugen bewertet werden kann, und dann muss eine allgemein zumutbare Schwelle definiert werden. Die Vorgehensweise bei der Ermittlung der Sicherheitsanforderungen und der Integration der funktionalen Sicherheit in das Gesamtsystem aus der Kraftwerkentwicklung kann dabei hilfreich sein.

Bei der funktionalen Sicherheit der Regelung und Aktorik können Vorbilder in der Luft- und Raumfahrt, teilweise im Bahnbereich und in der aktuellen Forschung und Entwicklung der Fahrzeugtechnik angewendet werden. Mehrfache, diversitäre funktionale Redundanz ist eines der erfolgversprechenden Mittel. Gleiches gilt auch für die Softwarekomponenten in der Situationsanalyse, Entscheidungsfindung und Bewegungsplanung, wobei bisher nur in der Robotik ähnlich komplexe Situationen beherrscht werden müssen. Das Risiko dort ist jedoch meist geringer.

Eine der größten Herausforderungen liegt in der Zuverlässigkeit und Verlässlichkeit der Umfeldwahrnehmung, die auch die Selbstwahrnehmung und Situationswahrnehmung mit einschließt. Aufgrund der offenen Menge an möglichen Situationen ist es nach Kenntnisstand des Autors bisher nicht gelungen, komplexe Anwendungen, wie in den Use-Cases beschrieben, sicher umzusetzen. Auch hier sind Hardware- und Softwareredundanz sowie funktionale Redundanz notwendig, beispielsweise bei der Zusammensetzung der das Umfeld wahrnehmenden Sensoren.

In den Forschungsprojekten zu autonomen Fahrzeugen ist weiterhin ein Sicherheitsfahrer notwendig, der das System überwacht – zum einen durch direkte Eingriffe, zum anderen durch Notstoppfunktionen per Funk oder durch Not/Aus-Schalter. Die betrachteten Forschungsprojekte fokussieren sich derzeit noch stark auf die Funktionen und weniger auf deren funktionale Sicherheit.

Die Sicherheit autonomer Fahrzeuge ist eine der wesentlichen Herausforderungen in der zukünftigen Forschung. Für die Entwicklung der Technologie sind aber nicht nur technische, sondern auch juristische und gesellschaftliche Probleme zu lösen.

Literatur

1. Albers, A., Brudniok, S., Otnad, J., Sauter, C., Sedchaicharn, K. (2006). Upper Body of a new Humanoid Robot – the Design of ARMAR III. 6th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, S 308–313. Genua, Italien
2. Basarke, C., Berger, C., Rumpe, B. (2007). Software & Systems Engineering Process and Tools for the Development of Autonomous Driving Intelligence. *Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication (JACIC)*, 4(12), S 1158–1174
3. Bergmiller, P., Maurer, M., Lichte, B. (2011). Probabilistic fault detection and handling algorithm for testing stability control systems with a drive-by-wire vehicle. 2011 IEEE International Symposium on Intelligent Control (ISIC), S 601–606. Denver, CO, USA
4. Bertozzi, M., Broggi, A., Coati, A., Fedriga, R. I. (2013). A 13,000 km Intercontinental Trip with Driverless Vehicles: The VIAC Experiment. *Intelligent Transportation Systems Magazine*, 5(1), S 28–41
5. Bicchi, A., Peshkin, M. A., Colgate, J. E. (2008). Safety for Physical Human-Robot Interaction. In B. Siciliano, O. Khatib (Hrsg), *Springer Handbook of Robotics*, S 1335–1346. Springer-Verlag Berlin Heidelberg
6. Binfet-Kull, M., Heitmann, P., Ameling, C. (1998). System safety for an autonomous vehicle. 1998 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Stuttgart, Deutschland
7. Broggi, A., Bertozzi, M., Fascioli, A. (1999). ARGO and the MilleMiglia in Automatico Tour. *Intelligent Systems and their Applications*, 14(1), S 55–64
8. Broggi, A., Buzzoni, M., Debattisti, S., Grisleri, P., Laghi, M. C., Medici, P., Versari, P. (2013). Extensive Tests of Autonomous Driving Technologies. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 14(3), S 1403–1415
9. Brooks, R. A. (1986). A robust layered control system for a mobile robot. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 2(1), S 14–23
10. Bubeck, A., Weisshardt, F., Sing, T., Reiser, U., Hägele, M., Verl, A. (2012). Implementing best practices for systems integration and distributed software development in service robotics – the Care-O-bot® robot family. IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), S 609–614. Fukuoka, Japan
11. Bundesministerium der Justiz, für Verbraucherschutz. (2013). *Straßenverkehrs-Ordnung*. Bonn, Deutschland
12. Carrano, C. S., Bridgwood, C. T., Groves, K. M. (2009). Impacts of the December 2006 solar radio bursts on the performance of GPS. *Radio Science*, 44 (RS0A25)
13. Chatham, A. (2013). Google’s Self Driving Cars: The Technology, Capabilities, Challenges. *Embedded Linux Conference*. San Francisco, CA, USA
14. Dickmanns, E. D. (2002). The development of machine vision for road vehicles in the last decade. 2002 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). Versailles, Frankreich

15. EASA. (2013). EASA LIST OF CLASS OR TYPE RATINGS AEROPLANES. Köln, Deutschland
16. Ehtle, K. (1990). Fehlertoleranzverfahren. Springer-Verlag Berlin Heidelberg
17. Fenton, R. (1970). Automatic vehicle guidance and control – A state of the art survey. *Transactions on Vehicular Technology*, 19(1), S 153–161
18. Fischer, H., Voges, U. (2011). Medizinische Robotersysteme. In R. Kramme (Hrsg), *Medizintechnik*, S 915–926. Springer-Verlag Berlin Heidelberg
19. Ganek, A., Corbi, T. (2003). The Dawning of the Autonomic Computing Era. *IBM Syst. J.*, 42(1), S 5–18
20. 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. (2012). Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung : gemeinsamer Schlussbericht der Projektgruppe. *Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft*
21. Geyer, S. (2013). Entwicklung, Evaluierung eines kooperativen Interaktionskonzepts an Entscheidungspunkten für die teilautomatisierte, manöverbasierte Fahrzeugführung. *Dissertation, Technische Universität Darmstadt, VDI Reihe 12 Band 770*
22. Ghosh, D., Sharman, R., Raghav Rao, H., Upadhyaya, S. (2007). Self-healing systems – survey and synthesis. *Decision Support Systems in Emerging Economies*, 42(4), S 2164–2185
23. Grisleri, P., Fedriga, I. (2010). The Braive Autonomous Ground Vehicle Platform. *IFAC Symposium on intelligent autonomous vehicles*, 7. Lecce, Italien
24. Hörwick, M. (2011). Sicherheitskonzept für hochautomatisierte Fahrerassistenzsysteme. *Dissertation, Technische Universität München*
25. Hörwick, M., Siedersberger, K.-H. (2010). Strategy and architecture of a safety concept for fully automatic and autonomous driving assistance systems. *2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, S 955–960. San Diego, CA, USA
26. IAEA. (2012). Safety of Nuclear Power Plants: Design – Specific Safety Requirements No. SSR-2/1. Wien, Österreich
27. Isermann, R. (2006). *Fault-Diagnosis Systems: An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg
28. Isermann, R., Schwarz, R., Stölzl, S. (2002). Fault-tolerant drive-by-wire systems. *IEEE Control Systems*, 22(5), S 64–81
29. ISO. (2011). EN 50128:2011 Railway applications – Communication, signalling and processing systems – Software for railway control and protection systems. Genf, Schweiz
30. ISO. (2011). ISO 26262:2011 Road vehicles – Functional safety. Genf, Schweiz
31. Kammel, S., Ziegler, J., Pitzer, B., Werling, M., Gindele, T., Jagzent, D., Schröder, J., Thuy, M., Goebel, M., von Hundelshausen, F., Pink, O., Frese, C., Stiller, C. (2008). Team AnnieWAY's autonomous system for the 2007 DARPA Urban Challenge. *Journal of Field Robotics*, 25(9), S 615–639
32. Kämpchen, N., Waldmann, P., Homm, F., Ardelt, M. (2010). Umfelderfassung für den Nothalteassistenten – ein System zum automatischen Anhalten bei plötzlich reduzierter Fahrfähigkeit des Fahrers. *AAET 2010, Braunschweig, Deutschland*
33. Kim, J., Rajkumar, R., Jochim, M. (2013). Towards Dependable Autonomous Driving Vehicles: A System-level Approach. *SIGBED*, 10(1), S 29–32
34. Korn, B., Tittel, S., Edinger, C. (2012). Stepwise integration of UAS in non-segregated airspace-The potential of tailored uas atm procedures. *Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNS)*, S 1–8. Herndon, VA, USA
35. Levinson, J., Askeland, J., Becker, J., Dolson, J., Held, D., Kammel, Kolter, J. Z., Langer, D., Pink, O., Pratt, V., Sokolsky, M., Stanek, G., Stavens, D., Teichman, A., Werling, M., Thrun, S. (2011). Towards fully autonomous driving: Systems and algorithms. *2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, S 163–168. Baden-Baden, Deutschland

36. Maurer, M. (2000). Flexible Automatisierung von Straßenfahrzeugen mit Rechnersehen. VDI-Verlag
37. Mirwaldt, P., Bartels, A., Lemmer, K. (2012). Gestaltung eines Notfallassistenzsystems bei medizinisch bedingter Fahrunfähigkeit. 5. Tagung Fahrerassistenz. München, Deutschland
38. Müller, R. (2003). Das Projekt RUBIN – Automatische U-Bahnen ab 2006 in Nürnberg: Mehr Service, niedrigere Kosten im Nahverkehr. 19th Dresden Conference on Traffic and Transportation Science. Dresden, Deutschland
39. NDMV. (2012). Adopted Regulation of the Department of Motor Vehicles LCB File No. R084-11. Carson City, NV, USA
40. Norman, D. A., Bobrow, D. G. (1975). On data-limited and resource-limited processes. *Cognitive Psychology*, 7(1), S 44–64
41. Nothdurft, T., Hecker, P., Ohl, S., Saust, F., Maurer, M., Reschka, A., Böhmer, J. R. (2011). Stadtpilot: First fully autonomous test drives in urban traffic. 2011 IEEE International Annual Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), S 919–924. Washington DC, USA
42. Pascoe, R. D., Eichorn, T. N. (2009). What is communication-based train control? *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 4(4), S 16–21
43. Pellkofer, M. (2003). Verhaltensentscheidung für autonome Fahrzeuge mit Blickrichtungssteuerung. Dissertation, Universität der Bundeswehr München
44. Psailer, H., Sustdar, S. (2011). A survey on self-healing systems: approaches and systems. *Computing*, 91(1), S 43–73
45. Rauch, S., Aeberhard, M., Ardelt, M., Kämpchen, N. (2012). Autonomes Fahren auf der Autobahn – eine Potentialstudie für zukünftige Fahrerassistenzsysteme. 5. Tagung Fahrerassistenz. München, Deutschland
46. Reschka, A., Böhmer, J. R., Nothdurft, T., Hecker, P., Lichte, B., Maurer, M. (2012). A Surveillance and Safety System based on Performance Criteria and Functional Degradation for an Autonomous Vehicle. 2012 IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), S 237–242. Anchorage, AK, USA
47. Reschka, A., Böhmer, J. R., Saust, F., Lichte, B., Maurer, M. (2012). Safe, Dynamic and Comfortable Longitudinal Control for an Autonomous Vehicle. 2012 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), S 346–351. Alcalá des Henares, Spanien
48. SAE International. (2014). Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems (J3016). SAE International
49. Schopper, M., Henle, L., Wohland, T. (2013). Intelligent Drive – Vernetzte Intelligenz für mehr Sicherheit. *ATZextra*, 18(5), S 106–114.
50. Shladover, S. (2007). PATH at 20 – History and Major Milestones. *Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 8(4), S 584–592
51. Singh, S. (2008). Special Issue on the 2007 DARPA Urban Challenge Part I (Vol. 25). Wiley Subscription Services, Inc.
52. Singh, S. (2008). Special Issue on the 2007 DARPA Urban Challenge Part II (Vol. 25). Wiley Subscription Services, Inc.
53. Singh, S. (2008). Special Issue on the 2007 DARPA Urban Challenge Part III (Vol. 25). Wiley Subscription Services, Inc.
54. Stanek, G., Langer, D., Müller-Bessler, B., Huhnke, B. (2010). Junior 3: A test platform for Advanced Driver Assistance Systems. 2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), S 143–149. San Diego, CA, USA
55. Stiller, C., Färber, G., Kammel, S. (2007). Cooperative Cognitive Automobiles. 2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). Istanbul, Türkei
56. Thorpe, C., Jochem, T., Pomerleau, D. (1997). The 1997 automated highway free agent demonstration. 1997 IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Boston, MA, USA

57. Thuy, M., Goebel, M., Rattei, F., Althoff, M., Obermeier, F., Hawe, S., Nagel, R., Kraus, S., Wang, C., Hecker, F., Russ, M., Schweitzer, M., Leon, F.P., Färber, G., Buss, M., Diepold, K., Eberspächer, J., Heißing, B., Wünsche, H.-J. (2008). Kognitive Automobile – Neue Konzepte und Ideen des Sonderforschungsbereichs/TR28. 3. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz. Garching b. München, Deutschland
58. Tsugawa, S. (1994). Vision-based vehicles in Japan: machine vision systems and driving control systems. *Transactions on Industrial Electronics*, 41(32), S 398–405
59. Urmson, C. (2012). Realizing Self-Driving Vehicles. 2012 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). Alcalá des Henares, Spanien
60. Wille, J. M., Saust, F., Maurer, M. (2010). Stadtpilot: Driving autonomously on Braunschweig's inner ring road. 2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), S 506–511. San Diego, CA, USA
61. Winkle, T., Gasser, T. M. (2014). E-Mail Kommunikation
62. Winner, H., Danner, B., Steinle, J. (2009). Adaptive Cruise Control. In: Winner, H., Hakuli, S., Wolf, G. (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, S 478–521. Wiesbaden: Vieweg Teubner | GWV Fachverlage GmbH
63. WNA. (2014). Fukushima Accident. Tech. rep., World Nuclear Association
64. Woodman, R., Winfield, A. F., Harper, C., Fraser, M. (2010). Safety control architecture for personal robots: Behavioural suppression with deliberative control. The Seventh IARP Workshop on Technical Challenges for Dependable Robots in Human Environments. Toulouse, Frankreich
65. Woodman, R., Winfield, A. F., Harper, C., Fraser, M. (2012). Building safer robots: Safety driven control. *The International Journal of Robotics Research*, 31(13), S 1603–1626
66. Yasunobu, S., Miyamoto, S. (1985). Automatic Train Operation System by Predictive Fuzzy Control. In M. Sugeno (Hrsg), *Industrial Applications of Fuzzy Control*, S 12–29. Elsevier Science Publishers B.V. (North-Holland)
67. Yeh, Y. (1996). Triple-triple redundant 777 primary flight computer. 1996 IEEE Aerospace Applications Conference, S 293–307. Aspen, CO, USA
68. Zhang, Y., Jiang, J. (2008). Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems. *Annual Reviews in Control*, 32(2), S 229–252
69. Ziegler, J., Bender, P., Lategahn, H., Schreiber, M., Strauß, T., Stiller, C. (2014). Kartengestütztes automatisiertes Fahren auf der Bertha-Benz-Route von Mannheim nach Pforzheim. Workshop Fahrerassistenzsysteme. Walting, Deutschland

Kai Rannenberg

Inhaltsverzeichnis

24.1 Einführung: Autos, Freiheit und Datenschutz	516
24.2 Zusätzliche durch autonomes Fahren gesammelte und verarbeitete Daten	517
24.2.1 Gesammelte und möglicherweise übermittelte persönliche Daten in heutigen vernetzten Autos	517
24.2.2 In autonomen Autos gesammelte persönliche Daten	519
24.2.3 Konsequenzen von Datenspeicherung für die Kontrolle über Daten und Missbrauch	521
24.2.4 Konsequenzen der Weitergabe von Daten an Dritte	522
24.3 Gibt es bestimmte Arten von Daten, die spezielle Hindernisse hervorrufen?	525
24.4 Anforderungen aus der Perspektive des Datenschutzes	526
24.4.1 Grundsätze	526
24.4.2 Weitere Überwachungsmaßnahmen für eine datenschutzverträgliche Verwendung der zusätzlichen Daten	530
24.4.3 Beschränkung von Zugriffsrechten und Einsatz von Verschlüsselung	531
24.5 Architekturüberlegungen	532
24.6 Was muss auf lange Sicht hin bedacht werden?	534
24.7 Fazit	536
Literatur	537

K. Rannenberg (✉)

Goethe-Universität Frankfurt, Deutsche Telekom Chair of Mobile Business and
Multilateral Security, Deutschland
Kai.Rannenberg@m-chair.de

24.1 Einführung: Autos, Freiheit und Datenschutz

Autos sind seit jeher ein Symbol für die Freiheit und Unabhängigkeit ihrer Benutzerinnen und Benutzer, seien es Fahrer oder Mitfahrer. Fahrer können frei entscheiden, wohin sie fahren, welche Strecke sie wählen und meistens auch, wie schnell sie reisen wollen (oder zumindest, wie oft sie eine Pause machen), ohne jemanden über ihre Entscheidungen informieren oder Rechenschaft darüber ablegen zu müssen. Viele Kunstwerke reflektieren diese Möglichkeit der Freiheit und der Flucht vor (häufig unzulässiger oder unangebrachter) Kontrolle, die Autos ihren Benutzern bieten. Eines der wohl eindrucksvollsten Beispiele hierfür sind die Episoden 3, 4, 6 und 7 des 1947 uraufgeführten Filmes „In jenen Tagen“ [1], die die mehr oder weniger erfolgreichen Autofahrten mehrerer Personen zeigen, die zwischen 1933 und 1945 von den Nationalsozialisten in Deutschland unterdrückt bzw. verfolgt wurden. Weitere Beispiele finden sich in Kap. 3. Gleichzeitig bietet ein Auto seinen Fahrern und Haltern eine geschützte Umgebung: Personen außerhalb können für gewöhnlich nicht hören, was innerhalb des Autos gesprochen wird, und sie können sich auch nicht einfach dazugesellen und der Unterhaltung beiwohnen. Auch wenn „My car is my castle“ nicht so populär ist wie „My home is my castle“, sehen viele Leute dennoch ihr Auto als Erweiterung ihres eigenen Heims. Dementsprechend kann man viele Haushaltsgegenstände in Autos vorfinden, und viele Haushaltsaktivitäten finden dort statt ([2], Paragraf 2).

Davon ausgehend könnten autonome Autos einfach eine Erweiterung der traditionellen Konzepte von Freiheit, Autonomie und Privatsphäre für ihre Fahrer und Benutzer darstellen. Jedoch macht „autonomes Fahren“ in erster Linie das Fahren autonom vom Fahrer. Gleichzeitig baut „autonomes Fahren“ stärker auf Interaktionen mit der Außenwelt als ein Auto, das von einem Menschen gefahren wird. Aus der Forschungswelt bekannte autonome Autos tasten ihre Umgebung ab und kommunizieren sogar häufig mit ihr wie z. B. mit anderen Autos in der Nähe. Über den Austausch mit anderen Entitäten in der näheren Umgebung hinaus gibt es Pläne, Autos durch Verkehrszentralen kontrollieren zu lassen, um ihr Verhalten (z. B. die Routenwahl) zu optimieren. Wie jede andere zentrale Einrichtung, die Daten sammelt, verursachen Verkehrszentralen Bedenken bezüglich der Privatsphäre. Dies motiviert dazu, die Datenflüsse und ihre Auswirkungen auf die Privatsphäre zu analysieren. Wenn man in Betracht zieht, dass Autos nicht nur eine große Menge an Daten über ihre Benutzer und ihre Umgebung sammeln, sondern diese auch für eine lange Zeit speichern und schließlich zu anderen Entitäten kommunizieren können, verstärkt dies noch die Notwendigkeit der Analyse.

Deshalb diskutiert dieses Kapitel fünf Leitfragen zu autonomem Fahren, die entsprechenden Datenflüsse sowie die Auswirkung der Interaktion zwischen Fahrzeugen auf die Privatsphäre:

1. Welche „neuen“ oder zusätzlichen Daten werden zur Realisierung des autonomen Fahrens gesammelt und verarbeitet und welche Konsequenzen ergeben sich daraus (Abschn. 24.2)?

2. Gibt es bestimmte Arten von Daten, die spezielle Hindernisse hervorrufen (s. Abschn. 24.3)?
3. Was ist aus der Perspektive des Datenschutzes zu berücksichtigen (Abschn. 24.4)?
4. Was ist bei der Gestaltung von Architekturen zu berücksichtigen, um schwerwiegende oder gar unlösbare Datenschutzprobleme zu vermeiden (Abschn. 24.5)?
5. Was muss auf lange Sicht hin bedacht werden (Abschn. 24.6)?

Diese Fragen werden, so weit wie möglich, anhand der Use-Cases diskutiert, die in Kap. 2 eingeführt wurden. Abschnitt 24.7 schließt dieses Kapitel ab.

24.2 Zusätzliche durch autonomes Fahren gesammelte und verarbeitete Daten

Zur Beurteilung von Chancen und Risiken, die mit der Sammlung und Verarbeitung zusätzlicher Daten verbunden sind, ist es hilfreich, diese Daten zu identifizieren. Dies geschieht entlang der vier Use-Cases (s. Kap. 2). Zuvor wird jedoch ein kurzer Überblick über die Daten gegeben, die bereits in einem nicht-autonom fahrenden Auto gesammelt oder verarbeitet werden können.

24.2.1 Gesammelte und möglicherweise übermittelte persönliche Daten in heutigen vernetzten Autos

Obwohl sich die Analyse in den übrigen Teilen dieses Abschnitts auf „neue“ oder zusätzlich erhobene Daten konzentriert, muss zunächst erwähnt werden, dass auch heutzutage schon viele Arten sensibler persönlicher Daten in Autos gesammelt und übertragen werden. Beispiele hierfür sind:

- Alle Arten von Standort- und Navigationsdaten: Typische Beispiele sind Reiseziele, -zeiten und -gewohnheiten („jedes Wochenende nach Stuttgart“) sowie Vorlieben bei der Routenplanung (landschaftlich schön versus schnell versus umweltfreundlich versus am Rande der Legalität). Insbesondere wenn ein Auto durch Systeme zur Einsatzdisposition, Diebstahlvermeidung, Autoversicherung oder Mautberechnung überwacht wird, werden Informationen über Aufenthaltsorte gesammelt und in vielen Fällen an die entsprechenden zentralen Stellen übertragen. Einige dieser Systeme speichern Daten aufgrund ihrer Sensitivität dezentral, andere hingegen jedoch nicht. Ein Beispiel, das kürzlich sehr bekannt wurde, ist das neue europäische eCall-System [3], [4], [5], das automatisch aktiviert wird, wenn Sensoren im Auto einen schweren Unfall feststellen. Einmal ausgelöst wählt das System automatisch die europäische Notfallnummer 112, baut eine telefonische Verbindung zu einer Notfallzentrale auf und sendet detaillierte Informationen über den Unfall an Rettungsdienste. Die

übertragenen Informationen beinhalten die Uhrzeit des Vorfalles, die genaue Position des verunglückten Fahrzeuges sowie die Fahrtrichtung (wichtig bei Autobahnen und in Tunneln). Durch die Betätigung eines Schalters im Auto kann ein eCall auch manuell ausgelöst werden, z. B. durch Zeugen eines schweren Unfalls.

- Daten zur Fahrdynamik: Daten zur Fahrdynamik wie die Beschleunigung liefern Informationen zum Verhalten des Autos, aber auch zum Verhalten des Fahrers, etwa zu seinem Fahrstil (ruhig versus aggressiv versus schnell versus am Rande der Legalität).
- Daten zum Fahrverhalten: Diese Daten können über die Zeit hinweg aus verschiedenen Lokationsdaten abgeleitet werden. So kann aus dem Vergleich der Lokation eines Autos auf der Autobahn mit der Lokation 15 Minuten zuvor die durchschnittliche Geschwindigkeit des Autos bestimmt werden. Hieraus kann geschlossen werden, ob eine Geschwindigkeitsbegrenzung möglicherweise zeitweise überschritten wurde, in einigen Fällen auch, dass sie überschritten wurde.
- Umgebung: Das Auto sammelt Daten aus der Umgebung, um die Fahrt oder spezielle Verkehrssituationen zu dokumentieren, für den Fall, dass eine solche Dokumentation später als hilfreich erachtet würde. Ein Beispiel hierfür sind Kameras auf dem Armaturenbrett, um aufzuzeichnen und möglicherweise zu übertragen, was vor dem Auto passiert. Daten aus der Umgebung können sehr wohl auch persönliche Daten anderer Personen enthalten, wie z. B. Nummernschilder anderer Fahrzeuge oder die Gesichter von Personen.

Dieser grobe Überblick wirft auch die Frage auf, bei welcher Art von Daten man tatsächlich von persönlichen Daten sprechen kann. Ein Teil der beschriebenen Daten scheint auf den ersten Blick nicht „persönlich“ zu sein. Die Erfahrungen aus mittlerweile mehreren Jahrzehnten von Datenschutzbemühungen zeigen jedoch, dass es keine Garantien gibt, dass Daten nicht auf bestimmte Personen zurückgeführt und missbraucht werden können. Eine Konsequenz dieser Lehre ist, dass „personenbezogene Daten“ (englisch „Personally Identifiable Information“ (PII)) heutzutage nicht nur Informationen sind, die eine Person direkt identifizieren, sondern jede Art von Information, die (a) benutzt werden kann, um die (betroffene) Person zu identifizieren, auf die sich die Daten beziehen, oder (b) möglicherweise direkt oder indirekt auf eine Person hinweisen [[8], Clause 2.9].¹ Die Person (oder der PII-Prinzipal, folgend dem englischen „PII Principal“ [[8], Clause 2.11]) ist dann das Individuum, dessen Daten verarbeitet werden. In unserem Fall sind PII-Prinzipale dann nicht nur Fahrer, Mitfahrer oder Autobesitzer, sondern auch Passanten und andere Fahrzeuge, die erfasst und auf irgendeine mögliche Art und Weise identifiziert werden können.

¹ Die Beziehung zwischen den Begriffen Daten und Informationen ist zu subtil und zu komplex, um sie hinreichend im Rahmen dieses Kapitels zu erläutern, Gleichzeitig sollte es hier ausreichen, Daten und Informationen als annähernd äquivalent zu betrachten. Würde man sich jedoch auf einen der Begriffe beschränken, tun sich Widersprüche mit der referenzierten Literatur auf.

Es gilt weiterhin, dass die praktische Sensitivität von Daten zu einem Zeitpunkt stark vom Kontext abhängig ist. So können z. B. die Standortdaten eines Autos sensitiver sein, wenn es in der Nähe des Rotlichtviertels einer Stadt geparkt ist. Weitere Beispiele finden sich in der nachfolgenden Diskussion der Use-Cases des autonomen Fahrens und der Interessen der an den Use-Cases Beteiligten. Zudem hilft die Analyse der Cases, neue Situationen und entsprechende Fragestellungen zu illustrieren.

24.2.2 In autonomen Autos gesammelte persönliche Daten

Dieser Abschnitt diskutiert anhand der vier in Kap. 2 vorgestellten Use-Cases die in autonomen Autos gesammelten Daten.

24.2.2.1 Use-Case 1: Autobahnautomat mit Verfügbarkeitsfahrer

Der Fahrroboter übernimmt das Fahren, aber nur auf Autobahnen oder autobahnähnlichen Schnellstraßen. Während der autonomen Fahrt wird der Fahrer zum Passagier, der die Hände vom Lenkrad sowie die Füße von den Pedalen nehmen und anderen Aktivitäten nachgehen kann. Der Fahrroboter koordiniert die sichere Übergabe zum Fahrer und stoppt das Auto an einem möglichst sicheren Ort, wenn nötig.

Neue und zusätzliche Daten, die das Auto in diesem Use-Case sammeln und lernen kann, sind:

- Fähigkeiten des Fahrers, z. B. ob der Fahrer in der Lage ist, die Kontrolle vom Roboter zurück zu übernehmen oder nicht und wie lange die Übergabe dauert. Beide Arten von Daten können von Interesse sein: als aktuelle Daten zur Steuerung von Reaktionen des Autos, aber auch längerfristig als Grundlage für Längsschnittbewertungen.
- Fahrverhalten: Zusätzlich zu Daten über das Fahrverhalten, die bereits heute verfügbar sind, ermöglicht dieser Use-Case auch das Sammeln weiterer Daten, beispielsweise, unter welchen Umständen der Fahrer die Kontrolle abgibt und/oder zurückfordert.
- Umgebung: Es können zusätzliche Daten der Umgebung gesammelt werden, um das autonome Fahren zu ermöglichen. Auch die Dokumentation der Fahrt selbst oder spezifischer Verkehrssituationen kann als hilfreich angesehen werden, um potenzielle Konflikte handhaben zu können. Wie in Abschn. 24.2.1 beschrieben, können Daten der Umgebung auch persönliche Informationen Dritter sein, beispielsweise Nummernschilder oder Gesichter. Daher bestehen Daten der Umgebung aus einer Mischung persönlicher Informationen verschiedener Personen, was sie sehr heikel macht.

Im Rahmen der Diskussion über rechtliche und haftungsbedingte Folgen des autonomen Fahrens (vgl. Teil V dieses Buches, insbesondere die Diskussion durch Gasser Kap. 25) kann angenommen werden, dass ein Interesse darin besteht, Daten zu sammeln, um mögliche Unfälle zu dokumentieren und zu untersuchen, welches Verhalten des Autos, des

Fahrroboters, des Fahrers oder anderer Parteien den Unfall verursacht haben könnte. Dies wäre im Einklang mit anderen Beispielen der Vorgehensweise von Strafverfolgungsbehörden, die ein großes Interesse an Daten haben, die durch die Computerisierung von Aktivitäten zugänglich werden, da computerisierte Aktivitäten meist einfach zu protokollieren sind.

24.2.2.2 Use-Case 2: Autonomes Valet-Parken

Der Fahrroboter stellt das Fahrzeug – nachdem die Insassen es verlassen haben und gegebenenfalls Transportgut ausgeladen wurde – in einer nahen oder auch entfernten Parkposition ab. Anschließend fährt der Fahrroboter das Fahrzeug von der Parkposition wieder zurück bzw. an eine andere gewünschte Adresse oder parkt das Fahrzeug um. Die Fahrer sparen so die Zeit für die Parkplatzsuche, das Abstellen sowie den Fußweg von einem weiter entfernten Parkplatz zum eigentlichen Ziel. Außerdem wird hierdurch der Zugang zum Fahrzeug (räumlich wie zeitlich) erleichtert. Der Parkraum wird durch das autonome Valet-Parken effizienter genutzt und die Parkplatzsuche effizienter gestaltet.

Neue und zusätzliche Daten, die das Auto in diesem Use-Case sammeln und lernen kann, sind:

- Dauer eines Aufenthaltes: Wie viel Zeit verbringen die Nutzer vor Ort?
- Gebiete von Interesse: Wo verbringen Nutzer mehr oder weniger Zeit?
- Fahrt- und Aufenthaltszeiten: Wann verbringen die Nutzer mehr oder weniger Zeit außerhalb ihres Autos?
- Unter welchen Umständen wird das Auto unbeaufsichtigt gelassen?
- Besuchsgewohnheiten: Wie oft begibt sich der Nutzer an einen bestimmten Ort, z. B. „jedes Wochenende zu einem bestimmten Supermarkt, einer Bar oder Diskothek“?
- Umgebung: Diese Daten sind im Prinzip die gleichen wie in Use-Case 1, variieren jedoch in ihrer Abhängigkeit von der Umgebung. Auf einem gefüllten Parkplatz kann das Auto pro Zeiteinheit mehr Nummernschilder erfassen als auf einer Autobahn, aber vermutlich weniger Gesichter, weil die meisten Autos leer sind. Auf dem Weg zum Parkplatz werden allerdings vermutlich oft mehr Gesichter erfasst werden, weil z. B. Fußgänger die Straßen überqueren, als auf dem Parkplatz selbst, vermutlich sogar mehr als auf der Autobahn.

Da es keine direkte Wechselwirkung zwischen Fahrer und Fahrzeug gibt, werden keine Daten über das Fahrverhalten erfasst.

24.2.2.3 Use-Case 3: Vollautomat mit Verfügbarkeitsfahrer

Use-Case 3 ist Use-Case 1 ähnlich, da in beiden Fällen der Fahrroboter die Aufgabe des Fahrens ausführt und der menschliche „Fahrer“ in dieser Situation als Passagier die Hände vom Lenkrad sowie die Füße von den Pedalen nehmen und andere Dinge tun kann. In Use-Case 3 kann der Fahrer jedoch in mehr Situationen die Kontrolle an den Fahrroboter übergeben und ist nicht wie in Use-Case 1 auf Autobahnen beschränkt. Folglich sind die neuen

und zusätzlichen Daten, die das Auto in diesem Use-Case sammeln und lernen kann, grundsätzlich die gleichen wie in Use-Case 1. Allerdings gibt es mehr Optionen für den Fahrer, die Aufgabe des Fahrens zu delegieren und die Kontrolle zurück zu übernehmen. Dies kann dazu führen, dass mehr Daten über das Verhalten des Fahrers erhoben werden können. Hierzu zählen insbesondere Daten über die Umstände, unter denen der Fahrer die Kontrolle delegiert und/oder wieder übernimmt. Ähnlich wie in Use-Case 2 können die Daten der Umgebung umfangreicher und sensitiver sein, als die auf einer Autobahn gesammelten Daten aus Use-Case 1.

24.2.2.4 Use-Case 4: Vehicle-on-Demand

Der Fahrroboter fährt das Fahrzeug in allen Szenerien mit Insassen, mit Fördergut, aber auch komplett ohne Inhalt autonom. Durch den Fahrroboter kann das Fahrzeug überall bereitgestellt werden. Passagiere können die Fahrzeit komplett frei für andere Dinge als für die Bewältigung der Fahraufgabe nutzen. Der Innenraum kann ohne die Einschränkungen eines Fahrersitzes völlig frei gestaltet werden, möglich ist jedoch eine Kamera, die in Richtung des Fahrgastraumes positioniert ist.

Während dieser Use-Case der anspruchsvollste aus der Perspektive des autonomen Fahrens ist, können weniger zusätzliche Daten gesammelt werden als in Use-Case 3. Insbesondere können keine zusätzlichen Daten über das Verhalten eines Fahrers gesammelt werden, da kein Fahrer mehr benötigt wird. Zusätzlich gesammelte Daten sind in diesem Case:

- Reiseverhalten (z. B. wann wollen Passagiere Pausen einlegen?),
- allgemeines Verhalten (oder Fehlverhalten) aller Passagiere im Auto,
- Daten über die Umgebung, beispielsweise, um einen Unfall und dessen Ursache zu dokumentieren (wenn Daten von Passagieren als nützlich für die Unfalldokumentation erachtet werden).

24.2.3 Konsequenzen von Datenspeicherung für die Kontrolle über Daten und Missbrauch

Grundsätzlich eröffnet die Speicherung von Daten die Möglichkeit für jede Art der Verarbeitung dieser Daten. Das mag theoretisch trivial erscheinen; jedoch ergeben sich die praktischen Folgen einer Datenspeicherung daraus, dass die gespeicherten Daten auch später noch gebraucht und missbraucht werden können, möglicherweise auch unter Umständen, die dem Nutzer ursprünglich gar nicht bewusst waren. Dies impliziert eine längerfristige Verantwortung für diese Daten. Diese Verantwortung muss bei der Partei liegen, die die Daten kontrollieren und Entscheidungen über deren Nutzung treffen kann.

Wenn man davon ausgehen kann, dass sich die im Auto gespeicherten Daten unter der alleinigen Kontrolle des Besitzers oder Fahrers des Autos befinden, kann die Frage nach der Verantwortung über die Daten relativ leicht beantwortet werden. Ist dies nicht der Fall,

erweitert sich die Verantwortung für die Speicherung und jede Art von Missbrauch der Daten auf die Parteien, die Speicherung und/oder Transfer der Daten kontrollieren.

Es gibt mindestens zwei Anzeichen dafür, dass einflussreiche Institutionen verlangen werden, die Daten aus dem Auto auch nach außerhalb zu transferieren:

1. Strafverfolgungsbehörden fordern häufig, dass Daten, die für technische oder kommerzielle Zwecke gespeichert werden, auch für Zwecke der Strafverfolgung zur Verfügung gestellt werden sollen. Gesetzgeber folgen dieser Forderung häufig. Das Autos und Ortsdaten ähnlichste Beispiel ist das der Mobilkommunikation. Seit dem Beginn der 1990er-Jahre war der GSM-Standard für zellbasierte Mobilkommunikation implementiert, und Ortsinformationen der Teilnehmer wurden in den Netzen verarbeitet. Schon bald darauf wurden einschlägige Regulierungen eingeführt, um es den „Bedarfsträgern“, etwa Strafverfolgungsbehörden, zu ermöglichen, auf alle Arten von Daten (inklusive Ortsdaten) in den GSM-Netzen zuzugreifen: Ein Beispiel hierfür ist die deutsche Fernmeldeüberwachungsverordnung [6], die bereits 1995 eingeführt wurde.
2. Internet-Unternehmen wie Google sind inspiriert und angetrieben durch die Konnektivität beliebiger Systeme und die Übermittlung von Daten. Ein Beispiel ist ein Statement von Jared Cohen, Direktor von Google Ideas, und Eric Schmidt, Executive Chairman von Google, in den Schlussfolgerungen ihres gemeinsamen Buches *The New Digital Age*: „Attempts to contain the spread of connectivity or curtail people’s access will always fail over a long enough period of time – information, like water, will always find its way through.” ([7], S. 254)

Nicht alles, was einflussreiche Institutionen gefordert haben, ist letztendlich auch so eingetreten, aber die Beispiele geben einen Eindruck von den Herausforderungen, die die Speicherung von Daten mit sich bringt, auch wenn die Daten eigentlich wohlbehalten in abgeschlossener und isolierter Weise gespeichert werden sollten.

24.2.4 Konsequenzen der Weitergabe von Daten an Dritte

Daten, die an Dritte jenseits der Domänen von Autoeignern oder -fahrern transferiert werden, ermöglichen es diesen Dritten, ihre Interessen zu verfolgen. Diese Interessen können mit den Interessen der sogenannten Datensubjekte, die durch die Daten identifiziert werden (in diesem Fall sind das typischerweise Autofahrer oder -eigner) im Konflikt stehen.

In diesem Abschnitt werden Beispiele für die folgenden Drittparteien diskutiert: Fahrzeughersteller, Versicherungsdienstleister, Flottenbetreiber, staatlich autorisierte Parteien, Peer-ad-hoc-Netzwerke, z. B. andere Verkehrsteilnehmer oder andere autonome Fahrzeuge, und Verkehrszentralen. Die Reihenfolge der Unterabschnitte folgt der ansteigenden Komplexität im Setting der Drittparteien.

24.2.4.1 Fahrzeughersteller

Fahrzeughersteller können daran interessiert sein, das Verhalten des Fahrzeugs zu dokumentieren, um Erkenntnisse über das Fahrzeug in Extremsituationen zu sammeln oder die Qualität der (oft sehr komplexen) Software zu testen. Dies ermöglicht ihnen, ihre Systeme zu verbessern und weiterzuentwickeln. Diese Art von Daten ähnelt denen, die Hersteller und Betreiber von Telekommunikationssystemen zum Zwecke der Qualitätssicherung und Wartung sammeln. Gleichzeitig beinhalten diese Daten jedoch sensitive Informationen über die Fahrer, z. B. die typische Fahrgeschwindigkeit, die Anzahl der Notbremsungen oder verpasste Übergaben vom Fahrroboter in den Use-Cases 1 und 3.

24.2.4.2 Versicherungsdienstleister

Versicherungsdienstleister sind häufig an ausführlicheren Informationen über ihre Kunden interessiert, um das Risiko, auf das sie sich einlassen, zu bewerten. Abhängig von der Art der Versicherung können unterschiedliche Informationen von Interesse sein. Für eine Unfallversicherung kann das Risiko beispielsweise vom Fahrverhalten (vorsichtiger oder risikofreudiger Fahrstil) abgeleitet werden, während für eine Diebstahlversicherung insbesondere ortsbezogene Daten (Regionen mit höherem oder niedrigerem Diebstahlrisiko für das jeweilige Fahrzeug) von Bedeutung sind. Alle Use-Cases liefern hier umfangreiche Daten. Use-Case 1 und 3 bieten vor allem Daten über das Fahrverhalten, Use-Case 4 ermöglicht das Erheben von Daten über das Verhalten der Insassen und deren Notrufe. Ortsbezogene Daten werden in allen Use-Cases erhoben. Diese Bewertungen ermöglichen vielleicht fairere Beurteilungen der Versicherungskunden, da sie ein kostenreduzierendes Verhalten belohnen. Die Nutzer werden dadurch aber auch einer erhöhten Überwachung ausgesetzt, ohne genaue Erläuterungen der damit verbundenen Risiken und Chancen zu erhalten. Versicherungsdienstleister treffen Entscheidungen oft auf Grundlage von Scoring-Systemen. Von diesen Systemen oder den von ihnen verwendeten Daten und Kriterien wissen Kunden oft nichts, da Versicherungsunternehmen diese Informationen als Geschäftsgeheimnisse betrachten und vor der Konkurrenz geheim halten wollen. Das führt dazu, dass Kunden von den Reaktionen einer Versicherung – wie der Verweigerung einer Vertragsverlängerung oder der Erhöhung einer Prämie – leicht überrascht werden können.

24.2.4.3 Flottenbetreiber

Flottenbetreiber, etwa Autovermietungen, sind in einer ähnlichen Situation wie Versicherungsunternehmen. Um ihren geschäftlichen Erfolg zu steigern, versuchen sie, das Risiko der Autovermietung an die jeweiligen Kunden zu bewerten und das Ergebnis in ihre Preisgestaltung einfließen zu lassen. Daher kann es zu ähnlichen Konsequenzen für die Kunden kommen wie bei Versicherungen (z. B. in Bezug auf (k)eine Verlängerung des Vertrages oder eine Erhöhung der Gebühren). Auch in diesem Szenario könnten in allen Use-Cases Daten erhoben werden. Der wesentliche Unterschied zum Versicherungsszenario ergibt sich aus der Tatsache, dass Flottenbetreiber in der Regel die Besitzer der Autos sind und somit mehr Kontrolle über ihre Autos haben als eine Versicherung über versicherte Autos ihrer Kunden. Dieser Unterschied ist wichtig für jegliches Konzept eines „Private Data

Vault“ zur Speicherung sensibler Daten von Mietern oder Fahrern (s. Abschnitt 24.5). Ein solches „Private Data Vault“ müsste in diesem Szenario entweder speziell im Auto installiert werden, um es vor dem Zugriff des Flottenbetreibers zu schützen, oder vom Mieter oder Fahrer mitgebracht werden.

24.2.4.4 Kommerzielle standortbezogene Dienste

Werbetreibende Unternehmen sind daran interessiert, jeweils passende Werbenachrichten an die jeweilige Zielgruppe zu adressieren. Dies beinhaltet auch die Wahl der richtigen Orte für entsprechende Werbebotschaften. So könnten beispielsweise Pendler, die aktuell im Stau stehen, mit einem Sonderangebot von Geschäften in der Nähe der nächsten Ausfahrt adressiert werden, damit sie aus dem Stau heraus zum Einkaufen fahren. Ebenso können Reisende, die auf dem Weg zu einem großen Flughafen im Stau stehen, von einem besser zu erreichenden Regionalflughafen umworben werden, damit sie ihren nächsten Flug von dort aus buchen: So werden auf der Autobahn von Norden in Richtung Flughafen San Francisco Flüge ab San José beworben. Deshalb interessieren sich werbetreibende Unternehmen für Verkehrsströme (und Staus). Darüber hinaus sind sie immer an weiteren Details über ihre Zielgruppe interessiert, die es ihnen erlauben, Rückschlüsse auf deren Verhalten wie z. B. die Art der Reise (Geschäftsreise, Pendeln, Freizeitausflug) zu ziehen.

24.2.4.5 Staatlich autorisierte Stellen

Staatlich autorisierte Stellen wie Polizeien oder Geheimdienste können die Daten zum Zwecke der Überwachung verwenden, um Verhalten zu erkennen, das sie sanktionieren oder vermeiden wollen. Im Falle der Verkehrspolizei könnte dies jede Art von Verhalten sein, das als unsicher angesehen wird oder gegen Verkehrsregeln verstößt wie z. B. Schwierigkeiten oder auffälliges Verhalten in der Interaktion mit dem Fahrroboter. Polizeikräfte, die Verbrechen untersuchen oder verhindern wollen, sowie Geheimdienste können an Navigations- oder Bewegungsdaten interessiert sein, um Informationen über das soziale Umfeld von Reisenden zu erlangen, etwa, wer wen wo trifft. Mit großer Wahrscheinlichkeit werden interessierte Geheimdienste und Bedarfsträger zudem eine ganz eigene Interpretation davon haben, wozu sie jenseits der Garantien und Zusicherungen von Datenschutzgesetzen autorisiert sind. Dies gilt vor allem für Daten, die Autos von ihrer Umgebung sammeln würden. Mit dem Ansatz, dass Daten von vielen oder sogar allen Autos kombiniert werden, ist eine spezifische Form des *crowd-sourcing* vorstellbar. Einige Gemeinden nutzen bereits heute *crowd-sourcing*, um Daten zur Umweltbelastung zu sammeln. Auch wenn in diesem Fall keine oder nur wenige personenbezogenen Daten gesammelt werden, ist das Beispiel dem Szenario, in dem ein Auto seine Umgebung ausspioniert, konzeptionell nahe.

24.2.4.6 Peer-ad-hoc-Netzwerke

Peer-ad-hoc-Netzwerke (z. B. andere Verkehrseinheiten oder autonome Fahrzeuge) können an jeglichen Daten zur Optimierung der Wegführung und Stabilisierung interessiert sein, die ihnen dabei helfen, die Straßenverhältnisse besser zu bewerten. Dabei können die In-

formationen anderer (etwa entgegenkommender) Fahrzeuge helfen, da diese ja bevorstehende Straßenabschnitte der eigenen Route schon passiert haben. Sofern es sich dabei um anonymisierte Daten handelt, die lediglich unter den beteiligten Peers ausgetauscht werden, sind die Folgen weniger schwerwiegend als bei Datenübertragungen zu einer (zentralen) Einrichtung, die Daten aggregiert (wie andere in diesem Kapitel beschriebene Einrichtungen).

24.2.4.7 Verkehrszentralen

Die Interessen von Verkehrszentralen hängen stark von den Interessen ihrer Betreiber und Eigentümer ab. Verkehrszentralen, die Verkehrsströme effizienter gestalten und die Auswirkungen von Verkehrsunfällen auf den Verkehrsfluss verringern wollen, sind an allen Daten interessiert, die ihnen helfen, die aktuelle und zukünftige Verkehrssituationen besser zu beurteilen: Fahrbedingungen können von Umgebungsdaten oder von Bewertungen des Fahrverhaltens abgeleitet werden, wie sie in allen Use-Cases anfallen; mögliche Staus können aus Reiseplänen und Navigationsdaten abgeleitet werden. Verkehrszentralen können auch an Kooperationen mit anderen Einrichtungen interessiert sein, um ihre Kosten zu refinanzieren oder sogar Gewinne zu erwirtschaften: Dies wird durch die Tatsache gestützt, dass andere Unternehmen, wie in den vorangegangenen Beispielen beschrieben, Nutzen aus den von Verkehrszentralen gesammelten Daten ziehen können.

Das Ausmaß, in dem Verkehrszentralen mit anderen Unternehmen, die an ihren Daten interessiert sind und Geld dafür bieten, kooperieren wollen, hängt von ihrem Status und ihrer finanziellen Ausstattung ab. Eine private gewinnorientierte Verkehrszentrale benötigt eine Finanzierung; eine öffentliche Verkehrszentrale steht eventuell unter geringerem finanziellem Druck. Allerdings gab und gibt es für viele der gegenwärtigen Investitionen in öffentliche Infrastrukturen Überlegungen, sie in öffentlich-privaten Partnerschaften durchzuführen, um sie trotz Geldmangel in den öffentlichen Haushalten durchzuführen. Dies gilt z. B. für die Mauterhebung und war ebenso für das Galileo-Satellitennetz geplant – auch wenn der Plan in diesem Fall mangels privater Interessenten nicht umgesetzt wurde. Auch Rundfunkanstalten werden immer abhängiger von einer privaten Mitfinanzierung, z. B. durch Werbung.

24.3 Gibt es bestimmte Arten von Daten, die spezielle Hindernisse hervorrufen?

Es ist prinzipiell unmöglich, die potenziellen Verwendungen von Daten für legitime oder illegitime Zwecke vorherzusagen. Darüber hinaus hat es sich als unmöglich herausgestellt zu garantieren, dass es auch auf lange Sicht zu keiner Verwendung oder keinem Missbrauch für eine spezielle Art von Daten kommt. Ein Grund hierfür ist, dass die heutige Konnektivität Verknüpfungen von Daten erheblich vereinfacht. Daten über die Fähigkeiten eines Fahrers bei der Übernahme der Kontrolle vom Fahrerroboter mögen auf den ersten Blick harmlos erscheinen, setzt man diese jedoch in Bezug zu historischen Daten (Fähigkeiten

vor zehn Jahren) oder zukünftigen Daten (Fähigkeiten in zehn Jahren), kann dies einen Eindruck von steigender oder sinkender Fahrtüchtigkeit verursachen. Dies kann zu unge-rechtfertigten Nachteilen für Fahrer führen, etwa bei der Berechnung von Versicherungs-prämien. Ähnliche Bewertungsmethoden bei der Beurteilung der Kreditfähigkeit haben sich in der Vergangenheit häufig als falsch erwiesen, wenn es um individuelle Bewertungen ging, auch wenn sie eine statistische Wertigkeit besaßen. Daher gibt es keine expliziten Regeln, bestimmte Arten von Daten als speziell einzuordnen und spezielle Hindernisse für deren Nutzung vorzusehen. Man mag den Eindruck haben, dass Daten, die Rückschlüsse auf die Gesundheit und medizinische Details erlauben, oder Daten zur politischen Meinung von Personen besonders sensibel sind. Es gibt jedoch keinen eindeutigen Beleg dafür, dass diese Daten immer sensibler sind als z. B. Daten über die finanzielle Situation einer Person.

Die rechtliche Konsequenz der beschriebenen Schwierigkeiten ist das Prinzip, für jedes einzelne Datum die Legitimität der Datenverarbeitung zu prüfen, statt eine allgemeine Freigabe vorzusehen (s. auch die Beschreibungen von „Rechtmäßigkeit und genaue Bestimmung des Zwecks der Datenverarbeitung“ und „Beschränkung der Erfassung“ in Abschn. 24.4.1). Somit muss für jede Art von Daten überprüft werden, ob ihre Erfassung notwendig ist, um den Dienst bereitzustellen, dessentwegen sie erhoben wurden. Zusätzlich ist zu überprüfen, ob die Art der Verarbeitung angemessen ist.

24.4 Anforderungen aus der Perspektive des Datenschutzes

Dieser Abschnitt diskutiert die Anforderungen aus der Perspektive des Datenschutzes. Einführend werden international etablierte Grundsätze und ihr Bezug zu den Use-Cases erläutert (s. Abschn. 24.4.1). Anschließend werden in Abschn. 24.4.2 zusätzliche Überwachungsmaßnahmen mit dem Ziel einer „datenschutzverträglichen“ Verwendung der Daten diskutiert, bevor in Abschn. 24.4.3 das Augenmerk auf die Beschränkung von Zugriffsrechten und auf den Einsatz von Datenverschlüsselung gelegt wird.

24.4.1 Grundsätze

Für jegliche Art persönlicher Daten, die erhoben oder erfasst und aus dem Einflussbereich der betroffenen Person heraus übermittelt werden, muss es eine klare Begründung geben, die die einschlägigen Datenschutzgrundsätze und -anforderungen berücksichtigt. Die Datenschutzgrundsätze und -anforderungen hängen von der jeweiligen nationalen, regionalen und gelegentlich auch branchenspezifischen Gesetzgebung ab, sodass eine vollständige Analyse hier unmöglich wäre. Erfreulicherweise existiert seit 2011 die internationale Norm ISO/IEC 29100 „Privacy Framework“ [8], die elf Datenschutzgrundsätze enthält. Diese Grundsätze wurden aus Datenschutzgrundsätzen abgeleitet, die in den Jahren und Jahrzehnten zuvor von Staaten, Ländern und internationalen Organisationen (z. B. der OECD und der EU) in ihren jeweiligen Regulierungen entwickelt worden waren. Die Editoren der

Norm kamen aus Deutschland und den USA, und Experten aus vielen weiteren Ländern beteiligten sich an dem Normprojekt. Ein Schwerpunkt der ISO/IEC 29100 „Privacy Framework“ ist die Implementierung der Datenschutzgrundsätze in IKT (Informations- und Kommunikationstechnologie)-Systemen. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Entwicklung von Datenschutzmanagement-Systemen, die in die IKT-Systeme von Organisationen integriert sind. Die Datenschutzgrundsätze zielen darauf, die Gestaltung, Entwicklung und Implementierung von Datenschutzrichtlinien und -kontrollen anzuleiten. Ein Entwurf verwandter Anforderungen findet sich auch in den jüngsten Empfehlungen des Deutschen Verkehrsgerichtstages [9]. Die elf Grundsätze lauten:

1. Einwilligung und Wahlfreiheit,
2. Rechtmäßigkeit und genaue Bestimmung des Zwecks der Datenverarbeitung,
3. Beschränkung der Erfassung,
4. Datenminimierung,
5. Beschränkung der Verwendung, Speicherung und Weitergabe,
6. Richtigkeit und Qualität,
7. Offenheit, Transparenz und Auskunft,
8. Individuelle Beteiligung und Zugriff,
9. Rechenschaftspflicht,
10. Informationssicherheit,
11. Erfüllung der Datenschutzerfordernungen.

Dieser Abschnitt konzentriert sich auf die Erläuterung der wichtigsten Grundsätze und gibt Beispiele basierend auf den Use-Cases.²

1. Einwilligung und Wahlfreiheit

Das Prinzip der Einwilligung wurde im Laufe der Zeit eingeführt, um sicherzustellen, dass eine von der Verarbeitung ihrer PII betroffene Person kontrollieren kann, ob ihre PII verarbeitet wird oder nicht. Eine Ausnahme von diesem Prinzip bilden Gesetze, die explizit eine Verarbeitung von PII ohne Einwilligung erlauben. Es wird aufgrund einschlägiger Erfahrungen ausdrücklich erwähnt, dass die Einwilligung eine informierte Einwilligung sein muss, damit Betroffene erklärt bekommen, wozu sie einwilligen und nicht „über den Tisch gezogen“ werden. Die Einwilligung muss außerdem in Form einer expliziten Einwilligungserklärung (*opt-in*) erfolgen. Es hat sich herausgestellt, dass die Forderung nach Wahlfreiheit wichtig ist, um zu vermeiden, dass Benutzer faktisch gezwungen werden einzuwilligen, weil sie keine Alternative zu dem jeweiligen Dienst haben. In den Use-Cases 1, 2 und 3 wird die Einwilligung des Besitzers, des Fahrers und jedes identifizierten Mitfahrers benötigt. Im vierten Use-Case wird die Einwilligung der Mitfahrer und gegebenenfalls des Fahrers benötigt. Die kritischste Frage entsteht jedoch bei der Einwilligung zur Verarbeitung der Daten

² ISO/IEC 29100 erläutert die Grundsätze ausführlicher.

der untersuchten Umgebung. Zum Beispiel sind private Überwachungskameras üblicherweise nicht rechtens, wenn sie öffentliche Flächen mit einbeziehen und dort Daten von Personen erfassen können. Für Daten von öffentlichen Überwachungskameras gibt es strikte Regeln entlang der folgenden Grundsätze.

2. **Rechtmäßigkeit und genaue Bestimmung des Zwecks der Datenverarbeitung**
Sich an diesen Grundsatz zu halten bedeutet: Sicherstellung, dass der Zweck der Datenverarbeitung vollständig geltendem Recht entspricht und sich auf eine zulässige Grundlage stützt; Kommunikation des Zwecks an den Betroffenen, bevor die Information erfasst oder für einen neuen Zweck benutzt wird; Verwendung einer Sprache für die Spezifikation, die klar und den jeweiligen Umständen angemessen ist; und, wenn zutreffend, die Bereitstellung von hinreichenden Erläuterungen für die Notwendigkeit der Verarbeitung sensibler PII. Ein Zweck kann eine gesetzliche Grundlage oder eine spezifische Autorisierung seitens einer autorisierten Datenschutz- oder Regierungsbehörde erfordern. Wenn der Zweck der Verarbeitung der PII nicht den einschlägigen Gesetzen entspricht, darf keine Verarbeitung stattfinden. Für die Use-Cases bedeutet dies, dass die Zwecke der Datenverarbeitung auf eine klare Art und Weise spezifiziert werden müssen. Dies wird eine besondere Herausforderung im Fall des Erfassens von Umgebungsdaten darstellen.
3. **Beschränkung der Erfassung**
Die Erfassung von PII muss im Rahmen der jeweiligen gesetzlichen Vorschriften bleiben und ist auf solche Daten zu begrenzen, die für den beschriebenen Zweck notwendig sind: In unserem Fall trifft dies auf alle Daten über das Verhalten des Fahrers und der identifizierten Mitfahrer zu. Wenn der Zweck das autonome Fahren ist, werden jegliche gesammelten Daten mit dem Zweck des autonomen Fahrens gerechtfertigt werden müssen (und nicht mit einer anderen Verwendung, auch wenn diese beispielsweise kommerziell attraktiv erscheint).
4. **Datenminimierung**
Das Prinzip der Datenminimierung ist eng mit dem Prinzip der Beschränkung der Erfassung verknüpft, bezieht sich aber auf eine strikte Minimierung der *Verarbeitung* von PII. Datenverarbeitungsprozeduren und IKT-Systeme sollen die PII minimieren, die verarbeitet wird, und den Zugriff darauf begrenzen; Default-Optionen sollen, wenn immer möglich, betroffene Personen nicht identifizieren, die Möglichkeit ihrer Überwachung reduzieren und die Verknüpfbarkeit der erfassten PII mit anderer PII begrenzen (und so auch die Verfolgbarkeit der betroffenen Personen); außerdem ist PII zu löschen und zu beseitigen, sobald der Zweck der PII-Verarbeitung entfallen ist, oder, falls es keine rechtliche Anforderung gibt, die PII aufzubewahren oder wann immer Löschen und Beseitigen zweckmäßig sind. Bei allen vier Use-Cases beschränkt dieser Grundsatz die Übertragung jeglicher Daten an zentrale Einheiten wie etwa Verkehrszentralen; PII, die nur benötigt wird, um die Situation im und um das Auto zu bewältigen, darf ohne Erlaubnis der betroffenen Personen nicht das Auto verlassen. Datenminimierung erfordert auch die Begrenzung der Speicherung erfasster Daten, insbesondere, wenn diese Daten einfach erneut erfasst werden können, sobald sie

wieder benötigt werden. Um die Verknüpfbarkeit gesammelter PII zu beschränken, wird zudem die Anonymisierung und Aggregation jeglicher Daten verlangt, die nicht individuell benötigt werden.

5. Informationssicherheit

Informationssicherheit bezieht sich auf den Schutz von PII mit entsprechenden Maßnahmen auf der operationellen, funktionalen und strategischen Ebene, um die Integrität, Vertraulichkeit und Verfügbarkeit der PII zu gewährleisten und sie über den gesamten Lebenszyklus hinweg gegen Risiken wie nicht autorisierten Zugriff, nicht autorisierte Vernichtung, nicht autorisierte Modifizierung, nicht autorisierte Veröffentlichung oder Verlust zu schützen. Informationssicherheit umfasst gegebenenfalls die Auswahl eines geeigneten Auftragsverarbeiters, um den Zugriff auf die PII auf diejenigen zu beschränken, die zur Ausübung ihrer Pflichten zugreifen müssen. Abschnitte 24.4.2 und 24.4.3 beschreiben entsprechende Maßnahmen.

Die Verwendung von Daten jenseits dessen, was für die Zurverfügungstellung eines Dienstes (für die die Daten erfasst wurden) nötig ist, erfordert eine explizite Einwilligung. Daher bedarf es für jegliche PII, die den Einflussbereich des PII-Prinzipals verlässt, einer klaren und aussagekräftigen Begründung unter Berücksichtigung der einschlägigen Datenschutzgrundsätze. Die Begründung muss den PII-Prinzipal darüber informieren, was er gewinnt und was er dafür aufgibt. Praktisch muss die Begründung also überzeugend, aber nicht tendenziös sein. Davon muss auch die Aufsichtsbehörde überzeugt sein, wenn sie prüft, ob der PII-Prinzipal getäuscht wurde, z. B. durch die Behauptung der Notwendigkeit einer Datenverarbeitung, die nicht notwendig war, wenn nach dem Prinzip der Datenminimierung eine alternative Methode oder Technologie hätte gewählt werden können. Die Aufsichtsbehörde wird auch überprüfen, ob Grundrechte durch die Verarbeitung der Daten gefährdet würden. Grundrechte können nicht einfach durch die Einwilligung der Benutzer aufgegeben werden, da die Benutzer möglicherweise nicht die damit verbundenen Konsequenzen erkennen. Ein verwandtes Beispiel wäre, Benutzer einer Wahlmaschine zu bitten, ihr Wahlverhalten speichern und verarbeiten zu dürfen.

Jede PII, die eine Diskriminierung von Personen aufgrund ihrer Gesinnung ermöglicht, ist in vielen praktischen Fällen besonders kritisch zu betrachten. Einschlägige Beispiele sind die Interessengebiete und entsprechenden Orte und Fahrtrichtungen, etwa zu einer politischen Demonstration und auch in Verbindung zu Aufenthaltsorten und Fahrtrichtungen anderer Personen, etwa in Bürgerinitiativen. Ein Beispiel für eine Begründung steht in der Grundsatzentscheidung des Deutschen Bundesverfassungsgerichtes von 1983 [10], die für Deutschland das Grundrecht auf „informationelle Selbstbestimmung“ etabliert hat und fordert, einen *Chilling Effect* bei der Bürgerbeteiligung in demokratischen Prozessen zu vermeiden:

Wer nicht mit hinreichender Sicherheit überschauen kann, welche ihn betreffenden Informationen in bestimmten Bereichen seiner sozialen Umwelt bekannt sind, und wer das Wissen möglicher Kommunikationspartner nicht einigermaßen abzuschätzen vermag, kann

in seiner Freiheit wesentlich gehemmt werden, aus eigener Selbstbestimmung zu planen und zu entscheiden. Mit dem Recht auf informationelle Selbstbestimmung wären eine Gesellschaftsordnung und eine diese ermöglichende Rechtsordnung nicht vereinbar, in der Bürger nicht mehr wissen können, wer was wann und bei welcher Gelegenheit über sie weiß. Wer unsicher ist, ob abweichende Verhaltensweisen jederzeit notiert und als Information dauerhaft gespeichert, verwendet oder weitergegeben werden, wird versuchen, nicht durch solche Verhaltensweisen aufzufallen. Wer damit rechnet, daß etwa die Teilnahme an einer Versammlung oder einer Bürgerinitiative behördlich registriert wird und daß ihm dadurch Risiken entstehen können, wird möglicherweise auf eine Ausübung seiner entsprechenden Grundrechte (Art. 8, 9 GG) verzichten. Dies würde nicht nur die individuellen Entfaltungschancen des Einzelnen beeinträchtigen, sondern auch das Gemeinwohl, weil Selbstbestimmung eine elementare Funktionsbedingung eines auf Handlungs- und Mitwirkungsfähigkeit seiner Bürger begründeten freiheitlichen demokratischen Gemeinwesens ist.

Hieraus folgt: Freie Entfaltung der Persönlichkeit setzt unter den modernen Bedingungen der Datenverarbeitung den Schutz des Einzelnen gegen die unbegrenzte Erhebung, Speicherung, Verwendung und Weitergabe seiner persönlichen Daten voraus. Dieser Schutz ist daher von dem Grundrecht des Art. 2 Abs. 1 in Verbindung mit Art. 1 Abs. 1 GG umfaßt. Das Grundrecht gewährleistet insofern die Befugnis des Einzelnen, grundsätzlich selbst über die Verwendung seiner persönlichen Daten zu bestimmen.

Ähnliche Überlegungen sind besonders in Ländern mit instabilen politischen Verhältnissen relevant, wo Bürger befürchten müssen, dass zukünftige Machthaber ihr Verhalten, das gegenwärtig völlig legal ist, im Rückblick nicht tolerieren. Dies kann auch die Reise zu politischen Treffen einschließen.

Hinzu kommt, dass die Veröffentlichungen von Edward Snowden [11] ernstzunehmende Schwächen im Datensicherheitsregime vieler PII-Verarbeiter aufgezeigt haben. Dies gilt insbesondere für Daten und PII, die für Geheimdienste interessant sind. Man kann erwarten, dass diese Entwicklung in zukünftige Risikoanalysen und Überlegungen mit einbezogen wird.

24.4.2 Weitere Überwachungsmaßnahmen für eine datenschutzverträgliche Verwendung der zusätzlichen Daten

Weitere Überwachungsmaßnahmen für eine datenschutzverträgliche Verwendung der zusätzlichen Daten sind zu erwarten. Sie sind z. B. durch den Grundsatz der Rechenschaftspflicht in der Norm ISO/IEC 29100 [8] motiviert.

Der Grundsatz der Rechenschaftspflicht beabsichtigt, dass die Verarbeitung von PII die Pflicht zur Sorgfalt und zur Aneignung konkreter und praktischer Maßnahmen zum Schutz der PII mit sich bringt. Dies gilt für alle, die PII verarbeiten. Diese Maßnahmen sind nicht nur dazu vorgesehen, die Verarbeitung abzusichern, sondern auch die Aufsicht durch die zuständigen Behörden (z. B. Datenschutzbeauftragte) zu ermöglichen und zu vereinfachen.

Der Grundsatz der Informationssicherheit (s. auch Abschn. 24.4.1) erfordert z. B. Kontrollen auf der operationalen, funktionalen und strategischen Ebene, um die Integrität, Vertraulichkeit und Verfügbarkeit der PII sicherzustellen und sie über den gesamten Lebenszyklus hinweg gegen Risiken wie nicht autorisierten Zugriff, nicht autorisierte Vernichtung, nicht autorisierte Modifizierung, nicht autorisierte Veröffentlichung oder Verlust zu schützen.

Typischerweise ist es wichtig zu überprüfen, wer Zugriff auf die PII hatte oder hat und wer mit ihr auf welche Art und Weise arbeitete oder arbeitet. Daher werden für jede zusätzliche Entität, die möglicherweise einen Zugriff auf die PII hat, zusätzliche Überwachungsmaßnahmen anfallen. Erfahrungen mit Audit-Maßnahmen zeigten, dass diese zu zusätzlichen Datenschutzproblemen führen können, da Audit-Aufzeichnungen noch kritischer und diskriminierender als die PII selbst sein können. Ein Beispiel hierfür wäre ein Eintrag in der Audit-Aufzeichnung einer Verkehrszentrale, dass die PII zu den Reaktionszeiten eines bestimmten Fahrers in der Interaktion mit dem Fahrroboter durch eine Arbeitsgruppe eingesehen wurde, die gefährliches Fahrverhalten analysieren soll.

Darüber hinaus sollten zusätzliche Überwachungsmaßnahmen nicht zu übermäßiger Überwachung der Individuen führen, die mit dem System arbeiten, zumindest in den Rechtssystemen, die Arbeitnehmerdatenschutz vorsehen. Hier ist der Grat zwischen Kundendatenschutz und Arbeitnehmerdatenschutz besonders schmal und komplex.

24.4.3 Beschränkung von Zugriffsrechten und Einsatz von Verschlüsselung

Beschränkung von Zugriffsrechten und Einsatz von Verschlüsselung sind typische Instrumente der Informationssicherheit. Die Beschränkung von Zugriffsrechten folgt dem Grundsatz „Informationssicherheit“ in ISO/IEC 29100: Der Zugriff auf PII ist auf diejenigen zu begrenzen, die den Zugriff benötigen, um ihre Aufgaben zu erfüllen, und auf genau die PII, die sie für diese Aufgaben benötigen. Zugriffskontrollen können genau festlegen, wer auf welche PII zugreifen darf. Dies setzt eine detaillierte Spezifikation des Systems voraus und kann am besten erreicht werden, wenn Datenschutz schon in der Entwurfsphase berücksichtigt wurde, beispielsweise, wenn festgelegt wird, welche Daten durch das Fahrzeug gesammelt werden und für welche Anwendung sie benötigt werden.

Ein anderer Weg, Zugriffsrechte zu beschränken, ist festzulegen, dass Gruppen von Entitäten nur gemeinsam Zugriff auf bestimmte Daten erhalten (z. B. auf jegliche Art von Audit-Aufzeichnungen). Dieses Vier-Augen-Prinzip (oder n-Augen-Prinzip) schützt zu einem gewissen Grad vor unerlaubter Nutzung von Daten und kann insbesondere bei Audit-Aufzeichnungen zur Kontrolle des Systemverhaltens angewendet werden, wenn diese Aufzeichnungen auch PII beinhalten. Es kann beispielsweise festgelegt werden, dass diese Arten von Daten nur verfügbar gemacht werden, um einen genau beschriebenen Systemfehler zu adressieren, und dass PII-Prinzipal und die interessierte Partei (beispielsweise eine autorisierte Werkstatt) sich über den Zugriff einigen müssen. Das n-Augen-Prinzip

kann auch durch Verschlüsselung realisiert werden, indem Teile des Schlüssels unter den jeweiligen Stakeholdern verteilt werden.

Verschlüsselung wird in der ISO/IEC 29100 nicht direkt erwähnt, und ihr Nutzen wird in einigen ISO/IEC-Mitgliedsstaaten manchmal kontrovers diskutiert. Wohl aber wird Verschlüsselung als Beispiel für eine Anforderung an die Übermittlung medizinischer PII über öffentliche Netzwerke erwähnt ([8], Clause 4.4.7). Verschlüsselung wird auch mehr und mehr von Datenschutzbeauftragten gefordert, die ihren Mehrwert verstanden haben, insbesondere wenn es darum geht, die Speicherung und Übertragung von PII zu schützen, auch ohne sich auf diejenigen, die die PII physikalisch speichern oder transportieren, verlassen zu müssen. Wenn Verschlüsselung verwendet wird, ist es wichtig, klar festzulegen, wer die Schlüssel für die Ver- und Entschlüsselung besitzt. Es kann sich anbieten, PII, die Rückschlüsse auf das Verhalten und die Fähigkeiten eines PII-Prinzipals erlaubt, durch die Verwendung eines asymmetrischen Verschlüsselungssystems zu schützen. Die PII wird dann mittels des öffentlichen Schlüssels des jeweiligen PII-Prinzipals verschlüsselt. Dies stellt dann sicher, dass die PII nur durch den dazugehörigen privaten Schlüssel des PII-Prinzipals entschlüsselt werden kann.

24.5 Architekturüberlegungen

Architekturen zur Datenverarbeitung müssen Interessen der Stakeholder des Systems berücksichtigen. Die in diesem Beitrag bisher erwähnten PII-Stakeholder sind Fahrer, Mitfahrer und Besitzer der Autos. Weitere Stakeholder sind möglicherweise Individuen, die mit den PII arbeiten müssen, eventuell auch eigentlich Unbeteiligte oder andere Verkehrsteilnehmer, wenn sie vom System identifiziert werden können.³ Es ist sinnvoll, insbesondere nicht professionelle Benutzer des Systems zu betrachten, da diese normalerweise weniger Möglichkeiten besitzen, sich selbst zu schützen [12]. Sie sind üblicherweise auch diejenigen, um die sich Datenschutzbeauftragte kümmern.

Im Allgemeinen können Architektureigenschaften von den in Abschn. 24.4.1 diskutierten Grundsätzen abgeleitet werden. Insbesondere die Grundsätze der Beschränkung der Erfassung, der Datenminimierung und der Informationssicherheit sind für Architekturen relevant. Eine Architektur, die die jeweiligen Dienste unter weniger Erfassung, Verwendung und Verbreitung von PII bereitstellt, mindert nicht nur die schädlichen Folgen eines Missbrauchs, sondern erleichtert auch die Sicherung der Informationen.

Drei Eigenschaften und Elemente von Architekturen sind besonders zu empfehlen:

1. Dezentrale Ansätze

Wenn PII nicht zu zentralen Entitäten, wie Verkehrszentralen, transferiert wird, ist das Risiko des Missbrauchs reduziert. Beispiele hierfür sind:

³ Dies mag eine Motivation sein, das System so zu gestalten, dass Unbeteiligte und andere Verkehrsteilnehmer nicht identifiziert werden können.

- Wenn in einem der Use-Cases eine Situation direkt zwischen zwei Fahrzeugen geklärt werden kann, ist dies besser, als die Verkehrszentrale oder andere externe Entitäten einzubeziehen. Manchmal wird das Thema der Vertrauenswürdigkeit der durch andere Fahrzeuge bereitgestellten Informationen zur Sprache gebracht. Eine einfache Lösung hierfür scheint die individuelle Identifikation von Fahrzeugen und der Abgleich mit einer zentralen Registrierungsdatenbank zu sein, ähnlich wie ein Polizeiauto Kennzeichen von Autos überprüft. Dieses Szenario mag ein schönes Vermarktungsszenario für den Vertrieb von Verzeichnisdiensten sein, es aber als Gewinn für Datenschutz oder Sicherheit zu betrachten, wäre zu kurzfristig. Das Szenario würde eine im Ausnahmefall stattfindende Polizeiaktivität zu einer regelmäßigen Aktivität machen, die möglicherweise von jedem Fahrzeug ausgeführt werden kann und so eine umfangreiche Massenüberwachungsinfrastruktur etablieren würde. Zudem gibt die Möglichkeit, Autos präzise zu identifizieren, keinerlei Garantie für die Informationen, die von diesem Fahrzeug bereitgestellt werden. Diese Informationen können auch dann manipuliert oder irreführend sein, wenn das Fahrzeug, das die Informationen bereitstellt, einen gültigen Identifikator vorweist.
- Das Konzept eines benutzereigenen „Private Data Vault“ (PDV) zur Speicherung von PII sollte näher untersucht werden, um die Speicherung sensibler Daten unter Kontrolle der Nutzer zu ermöglichen. Ein PDV könnte die PII des jeweiligen Nutzers speichern und gegen ungewollten Zugriff schützen, sodass kein Zugriff ohne die Einwilligung des Nutzers möglich ist. Insbesondere für Fahrer, die sich ein Auto mit anderen Fahrern teilen, oder Kunden von Autovermietungen wäre dies sehr hilfreich. Ein PDV kann im Fahrzeug installiert werden (im speziellen Fall, dass das Fahrzeug nur von einem Fahrer verwendet wird) oder idealerweise vom jeweiligen Fahrer in das verwendete Auto mitgebracht werden. Das PDV sollte Hardware verwenden, die die gespeicherten Daten gut schützen kann und könnte die erste Version eines vertrauenswürdigen Datenspeichers sein. Eine Kombination mit anderen persönlichen Geräten wie Mobiltelefonen wäre eventuell in Zukunft möglich; zunächst aber müssen diese Geräte sicherer werden und besser in der Lage sein, sich selbst zu schützen, insbesondere gegen Angriffe, um Daten von außen auszulesen. Verwandte Konzepte existieren für die Berechnung von Straßenmaut, beispielsweise [13] und Pay-as-you drive-Versicherungen wie beispielsweise [14].
- Wenn nicht „nur“ PII des Benutzers des Autos, sondern auch Daten von anderen Parteien wie z. B. der Umgebung gespeichert werden, sollte das Vier- oder n-Augen-Prinzip zur Zugriffskontrolle angewendet werden.
- In Use-Case 2 sind Verkehrszentralen oder andere Entitäten in die Auswahl von Parkplätzen involviert. Diese Entitäten sollten Fahrer oder Mitfahrer nicht nach allen möglichen Prioritäten zu Parkplätzen und Routen ausfragen, sondern stattdessen Optionen anbieten, aus denen die Benutzer oder ein lokales Assistenzsystem wählen können. Dies reduziert das Risiko einer zentralen Verarbeitung von Einstellungen der Benutzer in Bezug auf Preise und ortsbezogene Präferenzen.

2. Anonymisierung

Informationen, die zu einem gerechtfertigten Zweck erfasst werden, müssen nicht zwingenderweise so erfasst werden, dass das entsprechende Individuum identifizierbar ist. Selbst wenn die Informationen so erfasst werden, dass Individuen identifiziert werden können, müssen sie nicht auf diese Art und Weise weiterverarbeitet werden. Dies gilt insbesondere für jegliche Informationen, die nur in aggregierter Form benötigt werden:

- Verkehrs- und Stauanalysen müssen keine individuellen Autos oder gar Fahrer identifizieren.
- Die Interaktion zwischen Peers, etwa mit anderen Fahrzeugen Daten zur Verkehrssicherheit auszutauschen, benötigt keine Identifikation (s. die Diskussion unter 1. „Dezentrale Ansätze“ weiter oben).
- Nicht einmal die Zugriffskontrolle für Autos (z. B. die Entscheidung über den Zugriff auf Parkplätze) benötigt eine individuelle Identifizierung der Autos. Die Konzepte Partieller Identitäten (ISO/IEC 24760-1, [15]) und Privatsphärenfreundlicher Attribute Based Credentials [16] erlauben eine Beschränkung der Informationen auf das, was wirklich benötigt wird, beispielsweise in Use-Case 2 auf die zertifizierte Information, dass ein Parkplatz für das autonome Valet-Parken von einem Fahrzeug gebucht wurde. Das Fahrzeug muss sich gegenüber der Zugriffskontrolle des Parkplatzes nicht individuell identifizieren. Die Übertragung eines Tokens, das das Fahrzeug nur dann identifiziert, wenn das Token missbräuchlich mehrfach verwendet wird, ist ausreichend.

3. Systematische Löschung von PII

Die Löschung von Daten wird häufig in Konzepten und Lebenszyklusmodellen von IKT-Systemen vernachlässigt. Insbesondere im Fall von PII kann dies zu gefährlichem Missbrauch und entsprechenden Haftungsrisiken führen. Aus diesem Grund sollten bereits Architekturentwürfe in jedem Fall Konzepte zur systematischen Löschung von Daten beinhalten. Dies erfordert eine sorgfältige Überlegung, wie lange welche Daten zu welchem Zweck vorgehalten werden müssen. Beim Deutschen Institut für Normung (DIN) und auch in der ISO/IEC-Normung wurden Projekte zur Löschung von Daten diskutiert und teilweise gestartet (s. [17]). Diese Initiativen basieren zu einem großen Teil auf dem Konzept der Datenlöschung im Mautsystem Toll Collect für Lkw.

24.6 Was muss auf lange Sicht hin bedacht werden?

Es sieht danach aus, dass die Infrastrukturen für autonomes Fahren sehr groß und komplex werden und daher ein größerer Zeitraum für jede Planung zur Einführung, Verwendung und Wartung zu berücksichtigen ist. Daher sollten Anmerkungen zur längerfristigen Erfahrung im Bereich ICT und Datenschutz hilfreich sein:

1. Schleichende Erweiterungen des Anwendungsbereiches

Hat sich eine technische Infrastruktur erst einmal für einige Anwendungen etabliert, können neue zusätzliche Anwendungen recht einfach auf derselben Technologie und Infrastruktur aufbauen. Damit können sich neue Datenschutzrisiken schnell einschleichen, speziell wenn die neuen zusätzlichen Anwendungen weitere PII verarbeiten. Dies hat sich z. B. beim Mobilkommunikationsnetz GSM gezeigt, das viele mächtige Funktionalitäten (z. B. Lokalisierung) besitzt, deren De-facto-Einführung und -Nutzung in manchen Ländern aber in einer Grauzone stattfand. Ähnliche Ängste bestehen für Mautsysteme und deren Überwachungsinfrastrukturen, die in mehreren Fällen nur für Lkw oder andere überwiegend beruflich genutzte Fahrzeuge etabliert wurden. Eine Erweiterung auf privat genutzte Fahrzeuge ist dann oft sehr einfach zu realisieren.

2. Schleichende Übergänge von Test-Systemen zu Wirksystemen

Erfahrungen der internetorientierten Softwareentwicklung zeigen, dass der Schritt von einem Test-System oder gar einem experimentellen Prototypen mit reduzierten oder gar keinen Datenschutz- und Datensicherheitsvorkehrungen zu einem Wirksystem heutzutage sehr einfach ist, etwa durch das Ändern eines Weblinks in einem öffentlichen Portal, damit der Link auf ein neues Backend-System zeigt. Eine solche Änderung kann dazu führen, dass Testsysteme zu Wirksystemen werden, obwohl sie noch lange nicht angemessen geschützt sind. Insbesondere Projekte, die unter Ressourcenknappheit leiden und einen schnellen Erfolg benötigen, können dieser Versuchung erliegen.

3. Verbindliche pseudo-eindeutige Identifizierung

Mehr und mehr Computer speichern und verteilen Identifikatoren, die diese Geräte als mehr oder weniger einmalig und vertrauenswürdig identifizieren. Ein Beispiel hierfür ist die GSM International Mobile Station Equipment Identity (IMEI). Theoretisch ist die IMEI ein eindeutiger Identifikator für jedes Mobilkommunikationsgerät. Praktisch gesehen kann diese IMEI aber manipuliert werden. Ähnlich ist es in internetorientierten Netzen bei der Media Access Control Address (MAC-Adresse), die jeder Netzwerkschnittstelle als theoretisch eindeutiger Identifikator zugeteilt ist. Beide Identifikatoren sind auch für Fahrzeuge, die mit entsprechenden Kommunikationstechnologien ausgestattet sind, einschlägig. Während diese Identifikatoren zur Identifizierung von Angreifern sehr wenig nutzen, weil sie recht einfach manipuliert werden können, machen sie (inoffizielle) Datensammlungen sehr einfach und schaffen dadurch ein erhebliches Datenschutzproblem. Ferner wecken sie einen wiederkehrenden „Appetit“ interessierter Parteien auf mehr Identifikation von Benutzern in Kommunikationsnetzwerken oder bei Internetdiensten. Im Interesse eines effektiven Datenschutzes muss dieser Trend erkannt, berücksichtigt und überwunden werden [18].

24.7 Fazit

Man könnte annehmen, dass ein höheres Maß an Autonomie beim Fahren zu mehr Datenverarbeitung und dadurch auch zu mehr Überwachung führen würde. Tatsächlich ist dies aber nicht notwendigerweise der Fall. Die hauptsächlichen Faktoren, die zur Erfassung und Verbreitung zusätzlicher Daten beim autonomen Fahren führen, sind:

1. Die Interaktion zwischen Fahrzeug und Fahrer(n), Passagier(en) und gegebenenfalls Eigentümer(n) wird intensiver, was zur Speicherung und Verarbeitung zusätzlicher Daten führt.
2. Die Interaktion des Fahrzeugs mit anderen Entitäten, insbesondere Verkehrszentralen, wird intensiver, was zu zusätzlichen Übermittlungen potenziell sensibler Daten aus dem Fahrzeug heraus führt.

Ein autonom fahrendes Fahrzeug, das so autonom fährt, dass es nicht mit dem Fahrer zu interagieren braucht, muss nicht mehr Daten von einem Fahrer erfassen als ein herkömmliches Auto. Auch wenn das Fahrzeug in der Lage ist, autonom durch den Verkehr zu navigieren, würde es nicht mehr Daten kommunizieren als irgendein anderes Auto. Gegebenenfalls würde es sogar weniger Daten kommunizieren als ein herkömmliches Auto, das ein zentralisiertes Navigationssystem einsetzt und unter Überwachung steht, beispielsweise durch ein System, das fortwährend die Geokoordinaten des Fahrzeugs sammelt.

Natürlich können einige der realitätsnahen Zwischenszenarien, wie z. B. der Kontrollübergang an den Fahrer in kritischen Situationen (s. z. B. Use-Case 1) in Kombination mit einer zentralisierten Überwachung in solchen kritischen Situationen zu mehr Überwachung und dann auch zu mehr Datenschutzproblemen führen. Während also autonomes Fahren theoretisch nicht zu mehr Datenschutzproblemen führen muss, gibt es eine realistische Bedrohung, dass in der Praxis genau das passiert, wenn Entwurf und Architektur der Systeme Datenschutzprobleme nicht sorgfältig verhindern.

Daher ist ein Privacy-by-Design-Ansatz für autonomes Fahren und die einschlägigen Szenarien nötig. Zumindest die folgenden Fragen müssen gründlich geprüft werden:

- Ist die Erfassung, Verarbeitung und Übermittlung von Daten wirklich notwendig, um eine tatsächliche Verbesserung der Fahrsituation zu erreichen?
- Ist dieser Vorteil die zusätzlichen Datenschutzrisiken wert?
- Können die PII-Stakeholder (häufig Fahrer, Fahrgäste, Eigentümer) ertüchtigt werden, in einem möglichen Dilemma zwischen mehr Funktionalität oder mehr Verkehrssicherheit auf der einen Seite und weniger Privatsphäre auf der anderen Seite informiert und selbstständig zu entscheiden?
- Bleiben die Daten unter Kontrolle der PII-Stakeholder, oder verlassen sie deren Einflussbereich?

Es gibt eine klare Herausforderung, die Freiheit, die seit langer Zeit mit dem Automobil verbunden wird und ein Grund für seinen Erfolg ist, zu schützen.

Ein mögliches Alleinstellungsmerkmal für die etablierte Automobilindustrie und vor allem für Premium-Hersteller und -Marken ist es, nicht einfach dem Trend der Internetunternehmen zu folgen und Informationen überallhin fließen zu lassen, bis man vom Regulator oder empörten Kunden gestoppt wird, sondern einen hinreichenden Privatsphärenschutz für ihre Kunden zu ermöglichen. Gerade die Automobilindustrie hat in anderen Bereichen wie der Reduktion des Energieverbrauchs gezeigt, dass man primitive Lösungen nicht akzeptieren muss, sondern negative Auswirkungen überwinden und Ressourcen schonen kann, indem man sorgfältig plant und entwickelt. Über kurz oder lang wird dieser Ansatz in jedem Fall angeregt oder gefordert werden.

Danksagung

Dank gebührt Tim Schiller, Jetzabel Serna-Olvera und Markus Tschersich für hilfreiche Hinweise und Kommentare und Marvin Hegen und Markus Tschersich für die Hilfe bei der Übersetzung ins Deutsche.

Literatur

1. Helmut Käutner, Ernst Schnabel: In jenen Tagen; Camera-Filmproduktion 1947; mehr Information unter http://de.wikipedia.org/wiki/In_jenen_Tagen_%281947%29; zuletzt aufgerufen 2014-08-15
2. Angelina Göb: “Nimm Zwei – Carpool Lanes”; 2013-08-06; www.urbanfreak.de/carpool-lanes/; zuletzt aufgerufen 2014-08-15
3. Telematics News: eCall in German privacy debate; veröffentlicht: 01 February 2012; http://telematicsnews.info/2012/02/01/ecall-in-german-privacy-debate_f3011/; zuletzt aufgerufen 2014-08-15
4. Jan Philipp Albrecht: eCall – Überwachung aller Autofahrten muss gestoppt werden; www.greens-efa.eu/ecall-11553.html; zuletzt aufgerufen 2014-08-15
5. European Parliament: Decision of the European Parliament and of the Council on the deployment of the interoperable EU wide eCall service; P7_TA-PROV(2014)0359; <http://www.europarl.europa.eu/RegistreWeb/>; zuletzt aufgerufen 2014-08-15
6. Deutsche Bundesregierung: Verordnung über die technische Umsetzung von Überwachungsmaßnahmen des Fernmeldeverkehrs in Fernmeldeanlagen, die für den öffentlichen Verkehr bestimmt sind (18. Mai 1995, BGBl. I S. 722)
7. Eric Schmidt, Jared Cohen: The New Digital Age: Reshaping the Future of People, Nations and Business; Alfred A. Knopf 2013, ISBN-10: 0307957136
8. ISO/IEC 29100:2011 Information technology – Security techniques – Privacy framework, First edition, 2011-12-15, kostenlos via <http://standards.iso.org/ittf/PubliclyAvailableStandards/index.html>
9. 52. Deutscher Verkehrsgerichtstag 2014, 29. bis 31. Januar 2014 in Goslar, Arbeitskreis VII: Wem gehören die Fahrzeugdaten? www.deutscher-verkehrsgerichtstag.de/images/pdf/empfehlungen_52_vgt.pdf; zuletzt aufgerufen 2014-08-29

10. Bundesverfassungsgericht: Volkszählungsurteil: Urteil v. 15. Dezember 1983, Az. 1 BvR 209, 269, 362, 420, 440, 484/83; www.servat.unibe.ch/dfr/bv065001.html und Mitglieder des Bundesverfassungsgerichts (Hrsg.): Entscheidungen des Bundesverfassungsgerichts. 65, Mohr, Tübingen, S. 1–71, ISSN 0433-7646
11. Wikipedia: Global surveillance disclosures (2013–present); http://en.wikipedia.org/wiki/Global_surveillance_disclosure; zuletzt aufgerufen 2014-08-14
12. Kai Rannenberg: Multilateral Security – A concept and examples for balanced security; Pp. 151–162 in: Proceedings of the 9th ACM New Security Paradigms Workshop 2000, September 19–21, 2000 Cork, Ireland; ACM Press; ISBN 1-58113-260-3
13. Josep Balasch, Alfredo Rial, Carmela Troncoso, Christophe Geuens, Bart Preneel, and Ingrid Verbauwhede: PrETP: Privacy-Preserving Electronic Toll Pricing. Pp. 63–78 in Proceedings of the 19th USENIX Security Symposium, USENIX, 2010
14. Carmela Troncoso, George Danezis, Eleni Kosta, Josep Balasch, and Bart Preneel: PriPAYD: Privacy Friendly Pay-As-You-Drive Insurance. Pages 742–755 in IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing – IEEE TDSC 8(5), IEEE, 2011
15. ISO/IEC 24760-1:2011 Information technology – Security techniques – A framework for identity management – Part 1: Terminology and concepts, First edition, 2011-12-15, kostenlos via <http://standards.iso.org/ittf/PubliclyAvailableStandards/index.html>
16. Ahmad Sabouri, Ioannis Krontiris, Kai Rannenberg: Attribute-based credentials for Trust (ABC4Trust); Pp. 218–219 in Simone Fischer-Hübner, Sokratis K. Katsikas, Gerald Quirchmayr (Eds.): Trust, Privacy and Security in Digital Business – 9th International Conference, TrustBus 2012, Vienna, Austria, September 3–7, 2012; Springer Lecture Notes in Computer Science ISBN 978-3-642-32286-0; siehe auch www.abc4trust.eu
17. Volker Hammer, Karin Schuler: „Leitlinie zur Entwicklung eines Löschkonzepts mit Ableitung von Löschfristen für personenbezogene Daten“, Version 1.0.2, Stand 25. Oktober 2013; www.bfdi.bund.de/SharedDocs/Publikationen/Arbeitshilfen/DINLoeschkonzeptLeitlinie.pdf
18. Kai Rannenberg: Where Security Research Should Go in the Next Decade. Pp. 28–32 in Willem Jonker, Milan Petkovic (Eds.): Secure Data Management – 10th VLDB Workshop, SDM 2013, Trento, Italy, August 30, 2013, Post-Proceedings; 2014; Springer Lecture Notes in Computer Science 8425, ISBN 978-3-319-06810-7

Recht und Haftung

Tom Michael Gasser

Die Beiträge im Teil „Recht und Haftung“ richten den Blick aus einer übergeordneten Perspektive auf die jeweilige Bedeutung verschiedener Rechtsordnungen für ein gesellschaftliches Ordnungsgefüge, das autonomes Fahren ermöglicht. Der Blickwinkel ist hierbei geprägt von und teilweise limitiert auf die Kenntnis der Autoren vor allem des amerikanischen und deutschen Rechtssystems sowie der Praxis in Automobilunternehmen. Zumeist werden aber übergeordnete Aspekte der jeweiligen Rechtssysteme, Grundwerte der Gesellschaftsordnungen und voraussichtlich langfristig fortdauernde Rechtsinstitute und Interessen in den Blick genommen. Dies ermöglicht es, Schlussfolgerungen zu ziehen, die dem zukunftsgerichteten Thema gerecht werden. Auch angesichts dieses abstrakten Ansatzes sei für den vorliegenden Teil gleichwohl darauf verwiesen, dass die geäußerten Rechtsansichten allesamt die der Verfasser auf dieses Zukunftsthema sind und eine rechtliche Beratung im Einzelfall nicht werden ersetzen können.

Um die Herausforderungen des vorliegend betrachteten Fernziels autonomen Fahrens zu verstehen, muss man sich bewusst machen, dass das „eigenständige maschinelle Wirken“ im öffentlichen Straßenverkehr nur in wenigen Rechtsordnungen bislang mit der alltäglichen Rechtswirklichkeit eindeutig übereinstimmt – das gilt auch für einzelne proaktiv regulierende Bundesstaaten in den Vereinigten Staaten. Auch wenn es nämlich regelmäßig den geschulten Blick des Experten bedarf, um dies zu erkennen, setzen heutige prototypische Systeme bei hohen Automatisierungsgraden doch zumeist noch aus technischen Gründen einen Fahrer als Überwacher voraus. In der Abkehr von diesem eingeführten und breit akzeptierten fahrerischen Handeln bei der Fahrzeugsteuerung liegt (nicht nur) unter rechtlichen Gesichtspunkten die leitende Herausforderung autonomen Fahrens. Herausgearbeitet und aufgezeigt werden in den Beiträgen des vorliegenden Teils die Ursachen für bestehende rechtliche Unsicherheiten, die dieser Wandel mit sich bringt. Teilweise lassen sich weiterführende Fragen identifizieren, die gegebenenfalls helfen können, auftretende Veränderungen besser zu verstehen. Aber auch Strategien und Empfehlungen werden abgeleitet, die ihnen Rechnung tragen und den Wandel wesentlich erleichtern können.

Im Beitrag *Grundlegende und spezielle Rechtsfragen für autonome Fahrzeuge* geht Tom Gasser vertieft ein auf die grundlegende Betrachtung des heutigen Straßenverkehrs und seiner Gefahren, die vor dem Hintergrund des Menschenrechtes auf Leben und körperliche Unversehrtheit dargestellt werden. Hierauf basierend wird aufgezeigt, dass der grundlegende Wandel auf dem Weg zum autonomen Fahren darin liegt, vom fahrergesteuerten Fahrzeug zu einem eigenständigen maschinellen Wirken im öffentlichen Raum überzugehen, ohne dass Gefahren sich hierbei gänzlich werden ausschließen lassen. Diesen Systemwechsel ordnet der Verfasser vor dem verfassungsrechtlichen Hintergrund als wesentlich ein. Fortgesetzt wird die Betrachtung der rechtlichen Auswirkungen autonomen Fahrens anhand des resultierenden Automatisierungsrisikos und des gedanklichen Modells von „Dilemma-Situationen“. Hieraus ergeben sich grundlegende Anforderungen an die Gestaltung autonomer Steuerungsfunktionen beim Schutz von Fußgängern und Radfahrern wie auch weitere Forschungsfragen bei der Bestimmung von Ursachen für das Zustandekommen von Verkehrsunfällen im heutigen System des Straßenverkehrs. Ein vertieftes Verständnis dieser Kausalabläufe kann nach Ansicht des Verfassers zu weiterführenden Erkenntnissen im Rahmen der sicheren Gestaltung autonomen Fahrens führen. Neben einigen weiteren Spezialfragen wird vor allem auf die Kommunikation zwischen Verkehrsteilnehmern im Straßenverkehr eingegangen. Auch hier zeigt sich für das vorliegend betrachtete Fernziel autonomer Fahrzeugführung der Bedarf an grundlegend neuen Konzepten.

Die Produkthaftung in den Vereinigten Staaten steht im Mittelpunkt des Beitrages *Product Liability Issues in the U.S. and Associated Risk Management* von Stephen Wu. Das Risikomanagement von Produkthaftung ist eine wichtige Herausforderung, der sich die Automobilindustrie und andere in diesem Bereich tätige Unternehmen stellen müssen, wenn sie darauf abzielen, autonome Fahrzeuge in den Vereinigten Staaten zu verkaufen. Hersteller autonomer Fahrzeuge können dabei ganz erheblichen, möglicherweise sogar existenziellen Risiken ausgesetzt sein. Lebhaftige Darstellungen von Produkthaftungsfällen im Automobilbereich aus den vergangenen Jahrzehnten zeigen das abstrakt erscheinende Risiko und die auslösenden Faktoren auf. Dieser Überblick macht die Risiken greifbar und anschaulich. Vor diesem Erfahrungshintergrund werden Empfehlungen für das produkt haftungsrechtliche Risikomanagement im Entwicklungs- und Absicherungsprozess hergeleitet. Der Hersteller kann Risiken durch eine sorgfältige Vorbereitung auf mögliche Produkthaftungsfälle minimieren.

Ausgehend von einer abstrakten Betrachtung von Risiken und Unsicherheiten, die sowohl autonome als auch heutige Fahrzeuge aufwerfen, wird die erhebliche Herausforderung dargestellt, die eine Regulierung konkret bedeutet. Im Ergebnis des Beitrages *Regulation and the Risk of Inaction* kommt Bryant Walker Smith so zu insgesamt acht handlungsleitenden Empfehlungen strategischer Art – vorwiegend bezogen auf die öffentliche Hand, aber auch für betroffene private Akteure im Umfeld autonomen Fahrens. Diese Strategien können entweder den Risiken selbst oder nachteiligen Folgen und Auswirkungen autonomen Fahrens wirksam begegnen. Argumentativ stützt er seinen innovations-offenen Ansatz dabei auf Chancen, die eine Fahrzeugautomatisierung bieten kann. Eine

seiner grundlegenden einleitenden Feststellungen im Zusammenhang mit Regulierung ist dabei bestimmt durch ihre Notwendigkeit: Werden Entscheidungen in den handlungsleitenden Bereichen nicht von den für eine abstrakte Entscheidung Verantwortlichen getroffen, kommt es lediglich zur Verlagerung im konkreten Einzelfall einer Risikoverwirklichung: So werden sich dann Gerichte mit derselben Fragestellung auseinandersetzen müssen.

Die *Berücksichtigung technischer, rechtlicher sowie ökonomischer Risiken beim Entwicklungs- und Freigabeprozess automatisierter Fahrzeuge* ist Gegenstand des Beitrages von Thomas Winkle. Aus langjährigem Expertenwissen wird die positive technische Entwicklung der Fahrzeugsicherheit über die vergangenen Jahrzehnte nachgezeichnet. Einer höheren Sicherheit und Zuverlässigkeit der Fahrzeuge stehen diesbezüglich gestiegene Verbrauchererwartungen gegenüber. Diese Erwartungen und Anforderungen an den Automobilhersteller werden auch anhand der höchstrichterlichen Rechtsprechung zur Produkthaftung aufgezeigt und belegt. Hingewiesen wird aber insbesondere auf die mittelbaren ökonomischen Auswirkungen von Produktkrisen auf den Fahrzeughersteller, die in Form des Vertrauensverlustes von Kunden noch wesentlich schwerer wiegen können. Herausgearbeitet werden die tatsächlichen Möglichkeiten des Herstellers, über den Entwicklungs- und Freigabeprozess von Fahrzeugen auf die Fahrzeugsicherheit einzuwirken. Hierbei wird die Erarbeitung nicht nur neuer Ansätze in Bezug auf neue Sicherheits- und Testkonzepte gesehen, sondern vor allem die Empfehlung eines international abgestimmten Leitfadens, der – aufbauend auf dem entsprechenden Instrument zur sicheren Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen – in gleicher Weise für automatisierte Fahrzeuge empfehlenswert erscheint. Abschließend wird im historischen Rückblick auf die ersten Schritte des Automobils dargelegt, wie ein übertriebener Perfektionismus die Einführung einer Innovation verhindern kann. Als Schlussfolgerung wird deshalb die gewissenhafte und sorgfältige Anwendung vorliegender Expertenerfahrung als innovationsfreundlicher Ansatz bei der Entwicklung automatisierter Fahrzeuge dargestellt.

Tom Michael Gasser

Inhaltsverzeichnis

25.1 Einleitung	544
25.2 Bisherige Arbeiten und Vorüberlegungen	545
25.3 Ausgangssituation des heutigen Straßenverkehrs	546
25.4 Einordnung autonomen Fahrens	549
25.4.1 Aktueller Stand marktverfügbarer Fahrerassistenzsysteme	549
25.4.2 Autonomes Fahren	551
25.5 Grundsätzliche Rechtsfragen des autonomen Fahrens	551
25.5.1 Automatisierungsrisiko	552
25.5.2 „Dilemma-Situationen“	554
25.5.3 Möglichkeit zur Übersteuerung durch die Passagiere	559
25.5.4 Fehlerkompensationsfähigkeit beim autonomen Fahren	560
25.5.5 Kommunikation im Straßenverkehr	561
25.5.6 Regelübertretung	564
25.6 Spezielle Rechtsfragen autonomen Fahrens	565
25.6.1 Ordnungsrechtliche Bewertung fahrerloser Fahrzeuge	565
25.6.2 Bewertung autonomen Fahrens nach dem Haftungsrecht im Straßenverkehr	567
25.6.3 Bewertung nach dem Produkthaftungsrecht	568
25.6.4 Mögliche Abweichungen der rechtlichen Bewertung im internationalen Kontext	570
25.6.5 Sonderfrage: Aufsichtspflicht über Insassen autonomer Fahrzeuge	571
25.7 Fazit	572
Literatur	573

T.M. Gasser (✉)
Bundesanstalt für Straßenwesen, Deutschland
gasser@bast.de

25.1 Einleitung

Das Projekt „Autonomes Fahren im Straßenverkehr der Zukunft: Projekt Villa Ladenburg“ der Daimler und Benz-Stiftung nimmt Automatisierungsgrade in den Blick, die erst in fernerer Zukunft technisch umsetzbar werden. Die Bearbeitung der aufgeworfenen Rechtsfragen im vorliegenden Kapitel basiert daher wesentlich auf der Beschreibung von Use-Cases (s. Kap. 2), die erst die für eine Bewertung in einzelnen Punkten notwendige Konkretisierung vornehmen. Unsicherheiten in der Prognose zukünftiger technischer Ausgestaltung sind zu erwarten und werden sich in entsprechendem Maße auf die Annahmen und Schlussfolgerungen dieses Kapitels auswirken. Die resultierende Unsicherheit ist dennoch unvermeidbar, will man wichtige zusammenhängende Fragestellungen voranbringen. Dieses Kapitel versteht sich deshalb vor allem als Diskussionsbeitrag zu den gesellschaftlichen Aspekten automatisierten Fahrens aus einem rechtlichen Blickwinkel und nicht als Rechtsgutachten. Es wird vorwiegend die Situation nach dem in Deutschland aktuell geltenden Recht betrachtet. Die geäußerten Rechtsansichten sind die des Verfassers und beruhen auf neun Jahren Tätigkeit im Bereich der Forschung zu Fahrerassistenzsystemen.

Die im vorliegenden Projekt betrachtete gesellschaftliche Dimension autonomer Fahrzeuge geht nach dem zugrunde gelegten Verständnis weit über die aktuell in Deutschland geforderte Anpassung der rechtlichen Rahmenbedingungen hinaus. Nachfolgend wird eine besondere Fragestellung der „gesellschaftlichen Akzeptanz“ im Zusammenhang mit den Rechtsfragen von autonomen Fahrzeugen konkretisiert. Sie ist nicht auf den ersten Blick erkennbar und deckt nur einen Ausschnitt des nochmals weiteren Verständnisses im Projekt ab (s. hierzu Kap. 29).

Autonome Fahrzeuge werden sich voraussichtlich nur dann durchsetzen können, wenn ihr gesamtgesellschaftlicher Nutzen den Schaden überwiegt, der mit ihnen einhergeht [1]. Diese frühe, im Zusammenhang mit Fahrerassistenzsystemen aufgestellte These kann in Bezug auf den herausragend wichtigen Belang der Verkehrssicherheit aufgefasst werden. Die Anforderung wäre bereits dann erfüllt, wenn sich die Verkehrssicherheit insgesamt gesehen durch eine entsprechende Weiterentwicklung der Fahrzeuge verbessern würde (was allerdings nicht zwangsläufig gesellschaftliche Akzeptanz zur Folge hat (s. Kap. 29). Hierzu ist bereits heute absehbar, dass autonome, von maschineller Umfeldwahrnehmung abhängig gesteuerte Fahrzeuge nicht völlig fehlerfrei steuern werden. Entsprechend ist zu schlussfolgern, dass es auch im Fall autonomer Fahrzeuge einzelne schwerwiegende Schadensereignisse weiterhin geben dürfte, bei denen im Extremfall mehrere Menschen ihr Leben verlieren werden. Gesellschaftliche Akzeptanz autonomer Fahrzeuge ist deshalb notwendig damit verbunden, dass die Konsequenzen dieser Entwicklung von der Gesellschaft mitgetragen werden. Aus der rechtlichen Perspektive lässt sich zeigen, dass es hierbei ganz grundlegend darum geht, das „Wirken autonomer Fahrzeuge“ im öffentlichen Raum, im Sinne einer eigenständigen maschinellen „Handlung“ ebendort, zu verstehen und zu akzeptieren. Dieser Zustand im Straßenverkehr wäre tatsächlich völlig neuartig (auch andere Verkehrsmittel wie automatisierte, führerlose Bahnen setzen zumeist konsequent den Trennungsgedanken zwischen maschineller Steuerung und öffentlichem Raum mittels

physischer Barrieren um; es existieren soweit ersichtlich sehr wenige Ausnahmen¹, die dann aber den Ausschluss resultierender Gefahren nahezu lückenlos über ein Sicherheitskonzept mit einigem Aufwand verfolgen (vgl. [2]).

Dass ein Wirken autonomer Fahrzeuge im öffentlichen Raum des Straßenverkehrs neuartig ist, lässt sich aus rechtlicher Sicht – wie nachfolgend der Versuch unternommen wird – aufzeigen, um deutlich zu machen, dass die gesellschaftliche Akzeptanz einer derart tiefgreifenden Veränderung sich tatsächlich einstellen muss (s. Kap. 30), bevor sie in die Anpassung entsprechender Vorschriften einfließen kann.

25.2 Bisherige Arbeiten und Vorüberlegungen

Soweit erkennbar, wurde erstmals anlässlich eines Arbeitstreffens im Oktober 2002 durch Homann [1] die Frage nach gesellschaftlicher Akzeptanz von Fahrerassistenzsystemen mit maschineller Wahrnehmung bearbeitet. Die Inhalte dieser Arbeit lassen sich auf die vorliegende Fragestellung autonomer Fahrzeuge übertragen. Es bleibt lediglich festzuhalten, dass die bereits damals für „Fahrerassistenzsysteme neuer Generation“ diskutierte gesellschaftliche Akzeptanz bislang nicht als „Problem“ im Bewusstsein der Bevölkerung verankert ist, obwohl die seinerzeit diskutierten Systeme inzwischen längst marktverfügbar geworden und hinreichend verbreitet sein dürften, um ein existentes Problem – soweit überhaupt eines besteht – erkennbar werden zu lassen. Dies ist voraussichtlich darauf zurückzuführen, dass bislang spektakuläre negative Effekte durch solche Systeme (wie beispielsweise im Fall von Notbremsassistenten denkbar) nicht verzeichnet werden. Ein Grund hierfür könnte sein, dass die Systeme tatsächlich (nahezu) fehlerfrei arbeiten. Ein differenzierter Erklärungsansatz wird aber sein, dass entsprechende Eingriffe in die Fahrzeugführung nur ausgesprochen kurzfristig und in sehr unfallnahen Situationen erfolgen. So wird technisch eine Auslegung möglich, die ausschließlich dann eingreift, wenn die Auswertung der Umfelderkennung mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit ergibt, dass ein Eingriff tatsächlich erforderlich ist – negative Effekte werden so auf ein Minimum begrenzt. Zudem ist zu berücksichtigen, dass der Fahrer weiterhin in der Pflicht bleibt, alle erforderlichen Steuerungshandlungen selbst auszuführen. Dadurch steht der Fahrer potenziell in allen Fällen der Nichtauslösung als umfassende Rückfallebene zur Verfügung. Es ergibt sich somit die untergeordnete Bedeutung solcher Funktionen nicht nur in Bezug auf den zeitlichen Anteil am gesamten Steuerungsgeschehen eines Fahrzeuges, sondern auch hinsichtlich der von ihnen zu erwartenden Zuverlässigkeit. Solche Funktionen können deshalb nur sehr eingeschränkt im Zusammenhang mit eigenständiger bzw. autonomer Fahrzeugsteuerung herangezogen werden: Die untergeordnete Bedeutung und ein gegebenenfalls geringes

¹ Projekt RUBIN zur Automatisierung der U-Bahn-Linien U2 und U3 in Nürnberg: Vorübergehend erfolgte der Mischbetrieb von automatisierten und konventionell gesteuerten Zügen auf einer Teilstrecke Rathenauplatz – Rothenburger Straße. Zudem weist das Konzept entlang der Bahnsteige keine physische Trennung, sondern ein sensorbasiertes Bahnsteigsicherungssystem auf.

„Wirkfeld“ einer Funktion führen zur Stärkung der Fahrerrolle. Darin dürfte ein wichtiger Grund liegen, weshalb die Diskussion um die gesellschaftliche Akzeptanz bislang nicht geführt werden musste.

Es spricht allerdings wenig dafür, dass auch im Fall autonomer Fahrzeuge gesellschaftliche Akzeptanz in diesem Sinne keine Rolle spielen wird: Nimmt man die im vorliegenden Projekt zugrunde gelegten stellvertretenden Applikationen als Grundlage (s. Kap. 2), wird deutlich, dass sie einen sehr hohen Automatisierungsgrad aufweisen. Die „maschinelle Fahrfähigkeit“ dieser Applikationen als Bezugsgröße wird konsequenterweise hinsichtlich „Fähigkeiten der Perzeption, Kognition, Verhaltensentscheidung sowie Verhaltensausführung“ (s. grundlegende Definitionen in Kap. 2) näher definiert. Es tritt darin eine maschinelle „Autonomie“ des Fahrzeugs zutage, die es erlaubt, vom „Fahrroboter“ „als Subjekt ... analog zur Rolle des Fahrers in heutigen Fahrzeugen“ (s. Kap. 2) zu sprechen. Damit wird aber bereits deutlich, dass es sich hierbei um einen sehr grundlegenden Wandel handelt, der damit einhergehen wird, solche maschinelle Entscheidungen im öffentlichen Raum einzuführen.

Aus rechtlicher Sicht lässt sich zu der Frage gesellschaftlicher Akzeptanz autonomer maschineller Fahrfähigkeiten nur eingeschränkt etwas beitragen: Was rechtliche Vorschriften allerdings in hohem Maße widerspiegeln dürften, ist, was gesellschaftlich als konsensfähig angesehen werden kann – diese Annahme darf jedenfalls dann als gerechtfertigt gelten, wenn einzelne Vorschriften nicht in breiten Kreisen der Öffentlichkeit kritisch diskutiert und hinterfragt werden. Entsprechend lässt sich mittels Gegenüberstellung von autonomen Fahrzeugen mit geltendem Recht darstellen, dass nach dem Sinn und Zweck der Vorschriften gerade nicht eigenständiges „Wirken“ von Maschinen im öffentlichen Raum (verstanden im Sinne von Verhaltensentscheidung und Verhaltensausführung als neuartige Prägung maschinellen Wirkens, s. o.) umfasst ist.

Gesetze sollen abstrakt-generell auf beliebige Lebenssachverhalte anwendbar sein. Diesem Anspruch genügen auch die Vorschriften des Straßenverkehrsrechts grundsätzlich. Wenn allerdings Veränderungen der Lebenswirklichkeit eintreten, die dazu führen, dass vormals zugrunde gelegte Annahmen sich als nicht mehr gültig herausstellen, wie dies durch das Hinzutreten autonomer Fahrzeuge mit Entscheidungswirkung im öffentlichen Raum der Fall sein würde, kann dies über eine Rechtsanwendung nur dargestellt werden. Möglich ist insoweit, die eintretende Veränderung präzise zu beschreiben und die übergeordneten Grundwerte unserer Gesellschaft – wie die Grundrechte – argumentativ heranzuziehen, die den Rahmen beschreiben können, der voraussichtlich die Veränderungen überdauern wird und für die Entwicklung insgesamt maßgeblich ist.

25.3 Ausgangssituation des heutigen Straßenverkehrs

Grundlegende staatliche Pflichten lassen sich auch im Bereich von Straßenverkehrsunfällen auf die Verfassung zurückführen. Aufgrund der mit dem Straßenverkehr verbundenen Gefahren stehen vor allem die Grundrechte auf Leben und körperliche Unversehrtheit

(geschützt durch Art. 2 Abs. 2 Satz 1 Grundgesetz (GG)) im Mittelpunkt. Der sachliche Schutzbereich des Grundrechts auf Leben umfasst den Schutz jedes Menschen („Jedermanngrundrecht“) nicht nur vor gezielter Tötung, sondern auch vor Verhaltensweisen, die unbeabsichtigt (ungewollte Eingriffe wie beispielsweise Unfallfolgen) den Tod herbeiführen. Dabei ist die staatliche Schutzpflicht umfassend und gebietet auch Schutz vor rechtswidrigen Eingriffen Dritter. Dies führt in letzter Konsequenz, wenn Eingriffe nicht zu rechtfertigen sind, zur staatlichen Pflicht, ein Verbot solcher Eingriffe – beispielsweise durch den Erlass von Rechtsnormen – sicherzustellen [3].

An dieser Stelle wird eine Diskrepanz zwischen der Lebenswirklichkeit der Gesellschaft und verfassungsrechtlichem Anspruch deutlich. So wird insbesondere darauf hingewiesen, dass „... die Verkehrssicherheit [kaum diskutiert wird], obwohl die immer noch große Zahl von Verkehrstoten und von dauerhaft schwerbeschädigten Unfallopfern dazu allen Anlass gäbe.“ [3] Auch werden schwere Straßenverkehrsunfälle in den Medien regelmäßig nur als Thema von untergeordnetem, regionalem Interesse behandelt. Das sich darin offenbarende Phänomen des heutigen Straßenverkehrs liegt darin, dass die mit ihm verbundenen Gefahren so wenig Aufmerksamkeit erregen und in der gesellschaftspolitischen Diskussion so wenig Raum einnehmen [4], woraus zumindest ein Indiz für eine breite gesellschaftliche Akzeptanz dieses Zustands abgeleitet werden könnte.

Gleichwohl wirkt sich die Schutzpflicht bezüglich der „Risiken der Technik“ auch im Bereich des Straßenwesens ganz erheblich aus. Eine Statistik der (schwerwiegenden) Straßenverkehrsunfälle wird geführt (gemäß § 5 Abs. 3 Straßenverkehrsunfallstatistikgesetz mit einer Aufgabe der Unfallforschung bei der Bundesanstalt für Straßenwesen), sodass eine präzise Überwachung der Verkehrssicherheitsentwicklung und Unfallursachen erfolgen kann (wobei die Entwicklung der Zahl im Straßenverkehr Getöteter seit vielen Jahren insgesamt gesehen rückläufig ist). Die Verkehrssicherheit ist aber weit darüber hinaus eine Größe von entscheidender Bedeutung im (verkehrspolitischen) Handeln, beispielsweise (aber nicht abschließend) bei dem Erlass und der Änderung von straßenverkehrsrechtlichen (fahrerlaubnisrechtlichen, fahrzeugtechnischen, verhaltensrechtlichen und vieler weiterer) Regelungen, aber auch bei Straßenentwurf, Straßenunterhaltung, der Straßenausstattung etc. Trotz dieser vielfältigen Anstrengungen und laufenden Verbesserungen bleibt der bislang erreichte Stand von 3339 Getöteten und 374.142 Verletzten (in Deutschland im Jahr 2013) [5] eine – zwangsläufig unbefriedigende – Realität.

Letztlich stellt sich aus einer sehr grundlegenden rechtlichen Sicht hierbei die Frage nach der verfassungsrechtlichen Rechtfertigung dieser Eingriffe in das Grundrecht auf Leben und körperliche Unversehrtheit. Sie lassen sich argumentativ über das mit dem Kraftfahrzeugverkehr einhergehende Mobilitätsbedürfnis anderer Grundrechtsträger und deren Bereitschaft, sich dieser Gefahren um des mit ihnen verbundenen Nutzens willen auszusetzen, herleiten. Auch das ist aber nicht allgemein gültig, insbesondere, wenn man berücksichtigt, dass die von Kraftfahrzeugen ausgehenden Gefahren aufgrund der erheblichen Betriebsgefahr im Vergleich mit nichtmotorisierten Verkehrsteilnehmern hier keine völlig widerspruchsfreie Argumentation erlaubt: Während bei motorisierten Verkehrsteilnehmern noch damit argumentiert werden kann, dass sie bereit sind, erhöhte Risiken des

Kraftfahrzeugverkehrs zu tragen, die sie selbst schaffen, lässt sich dies nicht auf Fußgänger oder Radfahrer übertragen [3]. Fußgänger und Radfahrer haben gleichwohl mit 557 und 354 Getöteten und 30.807 sowie 71.066 der Verletzten insgesamt (für 2013) [5] einen erheblichen Anteil am gesamten Straßenverkehrsunfallgeschehen in Deutschland.

Gleichwohl erscheint es wahrscheinlich, dass in weiten Teilen der Gesellschaft Konsens dahingehend bestehen dürfte, Konsequenzen des Straßenverkehrs angesichts der Bedeutung für die Mobilität der Gesellschaft zu akzeptieren. Wagt man das gedankliche Experiment, weitreichende Einschränkungen des Kraftfahrzeugverkehrs zum Zwecke einer Verbesserung der Verkehrssicherheit in Erwägung zu ziehen, hieße dies zugleich, einige weitere gesellschaftliche Belange außer Acht zu lassen: Unmittelbar wirksame (radikale) Änderungen gingen offensichtlich mit einer erheblichen Einschränkung individueller (motorisierter) Mobilität einher und im Übrigen auch (aber nicht nur) der allgemeinen Handlungsfreiheit (grundrechtlich geschützt über Art. 2 Abs. 1 GG). Weil ein solcher Ansatz extrem wäre, ist seine Verhältnismäßigkeit infrage gestellt: Entsprechende, geeignete Maßnahmen bei einer Fahrleistung auf Straßen von insgesamt 724 Milliarden Kilometern (in 2013, für Deutschland) [5] zu identifizieren, die nicht in einschneidenden Konsequenzen für die wirtschaftliche Entwicklung des Landes, Berufsausübung, öffentliche Daseinsvorsorge und vieles andere mehr münden, erscheinen kaum denkbar. Eine Mehrheitsfähigkeit für Einschränkungen im Bereich des Kraftfahrzeugverkehrs ist vor diesem Hintergrund unwahrscheinlich. Der derzeit praktizierte Ansatz einer kontinuierlichen Verbesserung der Verkehrssicherheit erweist sich darum – wie die bislang insgesamt positive Entwicklung zeigt – als erfolgreich, realistisch und vorzugswürdig. Der oben aus verfassungsrechtlicher Sicht dargestellte Appell, die Verkehrssicherheit stärker zu diskutieren, stellt auch die bestehende rechtliche Situation des Straßenverkehrs nicht infrage, sondern betont zunächst die Bedeutung der Verkehrssicherheitsarbeit in diesem Zusammenhang.

Führt man aber die Ursachensuche für das im Vergleich mit anderen Verkehrsmitteln ungünstige Abschneiden des Straßenverkehrs weiter, lohnt es, auf eine sehr grundlegende Besonderheit von Straßen hinzuweisen: Mit der rechtlichen Einordnung von Straßen als „... öffentliche Sachen im Gemeingebrauch ...“, [die] einer unbeschränkten Öffentlichkeit unmittelbar und ohne besondere Zulassung für eine bestimmungsgemäße Benutzung zur Verfügung stehen ...“, mithin die Straße als „Mehrweckinstitut“ [6], wird treffend eine Eigenschaft hervorgehoben, in der das Verkehrsgeschehen wie wir es heute kennen – und damit auch das resultierende Unfallgeschehen – wurzelt. Straßen stehen als öffentliche Sache im Gemeingebrauch auch keineswegs nur zum Zweck der Ortsveränderung zur Verfügung (sogenannter Verkehr im engeren Sinne), sondern dienen auch dem geschäftlichen und kommunikativen Verkehr (sogenannter Verkehr im weiteren Sinne) [7]. Es ergibt sich in letzter Konsequenz dieser Zweckbestimmung der „Straße“ eine Vielfalt im Verkehrsgeschehen, verstanden im Sinne einer Vielfalt der möglichen Verkehrsteilnehmer, Verkehrsabläufe, plötzlicher, unerwarteter Ereignisse sowie Zustände und Entwicklungen zwischen Verkehrsteilnehmern auf Straßen. Eine vergleichbare Vielfalt möglicher Interaktionen, an denen nahezu die gesamte Bevölkerung in irgendeiner Form teilhat und das mit einem vergleichbaren Verletzungsrisiko verbunden wäre, ist in anderen Lebensbereichen

ohne Beispiel. Die Straße hat damit eine vielfältige Funktion, die bei dem von anderen Verkehrsträgern in Anspruch genommenen Raum zumeist nicht besteht. Diese Funktionsvielfalt wirkt sich im Rahmen der in Betracht zu ziehenden Umstände im Zusammenhang mit Fahrzeugführung ganz erheblich aus: Die Anforderungen an die verkehrssichere Durchführung der Fahraufgabe sind komplex und vielfältig. Vom Kraftfahrer sind die umfassende Wahrnehmung der Verkehrssituation und unmittelbare Entscheidung und Umsetzung in geeignete Handlungen, insbesondere die Gefahrerkennung, gefordert. Diese ordnungsrechtliche Aufgabe wird heute im Wesentlichen mit verhaltensrechtlichen und fahrerlaubnisrechtlichen Vorschriften wahrgenommen. Welche Bedeutung die Vielfältigkeit und Komplexität der Aufgabe bei einer Ausführung durch eine maschinelle Fahrzeugsteuerung in rechtlichen Kategorien entfaltet, wird nachfolgend noch herausgearbeitet.

25.4 Einordnung autonomen Fahrens

Vor diesen Hintergrund tritt im Rahmen des vorliegenden Projektes zum „autonomen Fahren“ die grundlegende und weitreichende Rechtsfrage, wie autonome Fahrzeuge sich in diese Gemengelage rechtlich einfügen könnten. Als Ansatzpunkt einer Beantwortung ist – wie bereits oben ausgeführt – die beschriebene Eigenschaft solcher Fahrzeuge als „Fahrroboter“ bzw. „Subjekt“ analog zum Fahrer (s. Kap. 2) erneut aufzugreifen, auszulegen und hinsichtlich der hiermit verbunden Konsequenzen für die Lebenswirklichkeit darzulegen.

25.4.1 Aktueller Stand marktverfügbarer Fahrerassistenzsysteme

Bislang existiert eine Handlungs- und Entscheidungsqualität ausschließlich im Fall menschlicher Handlung (die immer mindestens in Form eigener fahrerischer Wahrnehmung und Entscheidung vorliegt – zumindest im Sinne einer ständigen Verpflichtung hierzu). Tatsächlich handelt es sich hierbei um das heute noch aktuelle Minimum an fahrerischer Beteiligung bei der Fahrzeugsteuerung: Aktuelle Fahrerassistenzsysteme im weiteren Sinn können den Fahrer nur darin unterstützen, das Fahrzeug zu führen, sie ersetzen ihn aber nicht. So ist nach aktuellem Stand (August 2014) eine Arbeitsteilung zwischen Fahrer und Fahrerassistenzsystem denkbar, die aktiv die Längs- und Querführung des Fahrzeuges steuern (auf Basis eigener, maschineller Umfeldwahrnehmung). Diese Steuerung besitzt aber gerade keine eigenständige Entscheidungsqualität: Es wird vielmehr jederzeit vorausgesetzt, dass der Fahrer unmittelbar eingreift und die Steuerung des Fahrzeuges sofort wieder übernimmt, wenn dies erforderlich wird – gleich aus welchen Gründen; beispielsweise könnte auch eine fehlerhafte Umfeldwahrnehmung des Systems zugrunde liegen. Damit liegt aber beim Fahrer eine übergeordnete Rolle und Verantwortung, sodass die Fahrzeugsteuerung durch das System nur abgeleitet und untergeordnet erscheint. Aus technischer Sicht der Arbeitsteilung ist dies derzeit auch notwendig, weil im Markt verfügbare Fahrerassistenzsysteme nicht in der Lage sind, das Erreichen aller Systemgrenzen von

sich aus zu erkennen. Entsprechend lautet ein charakteristischer Warnhinweis (von mehreren) in der Instruktion für das System „DISTRONIC PLUS“ (eine adaptive Geschwindigkeitsregelung und damit ein System der Längsführung der Firma Daimler AG) nach Stand August 2014:

WARNUNG

Die DISTRONIC PLUS und der aktive Totwinkel-Assistent sind nur Hilfsmittel, die Sie beim Fahren unterstützen sollen.

Sie können Ihre Aufmerksamkeit nicht ersetzen. Die Verantwortung für den Abstand zu anderen Fahrzeugen, für die gefahrene Geschwindigkeit und für rechtzeitiges Bremsen liegt bei Ihnen. Achten Sie stets auf das Verkehrsgeschehen und Ihre Umgebung. Sie könnten sonst Gefahren zu spät erkennen, einen Unfall verursachen und sich und andere verletzen. [8]

Aus diesem Warnhinweis – der sich auch im Fall anderer heutiger Fahrerassistenzsysteme in vergleichbarer Weise findet – ergibt sich sehr klar, dass das System den Fahrer nur unterstützen kann, während der Fahrer ununterbrochen zu eigener Wahrnehmung der Verkehrssituation (unverändert) angehalten bleibt. Alle durch das System automatisierten Steuerungsvorgänge sind durch den Fahrer zu kontrollieren und gegebenenfalls durch eigene Bedieneingaben zu überstimmen.

Fahrerassistenzsysteme werden darum aus regelungstechnischer Sicht als „redundant-parallele“ Form der Arbeitsteilung von gleichen Aufgaben beschrieben [9]. Diese arbeitswissenschaftliche Beschreibung ist auch vor dem rechtlichen Hintergrund richtig, sagt aber noch nichts darüber aus, wo die Entscheidungsbefugnis im Fall widersprechender Arbeitsausführung liegt. Die Autorität, das Fahrerassistenzsystem jederzeit zu überstimmen, liegt bei Fahrerassistenzsystemen heute immer beim menschlichen Fahrer. Der sich aus den Hinweisen der Bedienungsanleitung (bzw. Instruktion) ergebende bestimmungsgemäße Gebrauch des Systems geht immer dahin, die geeignete Arbeitsausführung des Systems zu beobachten und zu kontrollieren sowie abzuändern, wenn sie in ungeeigneter Weise erfolgt.

Werden die Längs- und die Querverführung eines Fahrzeuges, also die beiden wesentlichen Aspekte der Fahraufgabe hinsichtlich der Steuerungsausführung, zeitgleich automatisiert, wird diese Arbeitsteilung heute als teilautomatisch bezeichnet [10]. Dies ändert aber nichts daran, dass auch solche Systeme nicht in der Lage sind, Systemgrenzen von sich aus zu erkennen und deshalb der redundant-parallelen Wahrnehmung, Entscheidung und Handlung eines menschlichen Fahrers (verstanden als dessen Ausübung von Autorität im Sinne einer „Übersteuerung bei jedem in irgendeiner Weise erkennbaren Bedarf“) notwendig unterliegen. Somit kommt dem Aspekt der „Autorität“ bei einer durch den Fahrer bestimmungsgemäß zu überwachenden Automatisierung die rechtlich entscheidende Bedeutung zu.

Im Ergebnis bleibt daher festzuhalten, dass den bis heute marktverfügbaren Fahrerassistenzsystemen niemals eine eigenständige, sondern ausschließlich eine abgeleitete Handlungs- und Entscheidungsqualität bei der Fahrzeugsteuerung zukommt, die sich unter vollständiger Autorität des Fahrers vollzieht, der sie ständig bestimmungsgemäß überwacht.

25.4.2 Autonomes Fahren

Grundlegend anders stellt sich dies im Fall autonomen Fahrens dar, das mit vier stellvertretenden Applikationen für die vorliegende Bewertung (s. Kap. 2) herangezogen wird. Alle vier Applikationen sehen gleichermaßen einen Fahrroboter vor, der die Fahrzeugsteuerung übernimmt. Selbst die Applikation des „Autobahnautomaten mit Verfügbarkeitsfahrer – Autobahnpiilot“, die deutlich an heutige Fahrerassistenzsysteme erinnert, setzt gerade nicht voraus, dass der „Fahrer“ während der automatisierten Fahrt überhaupt noch eine Aufgabe wahrnimmt, die dem heutigen Bild eines „Fahrers“ entspricht. Dies tritt in der eindeutigen Formulierung zutage, der Fahrer werde „... während der autonomen Fahrt zum einfachen Passagier ...“.

Das autonome Fahren sieht damit im Kern vor, dass die redundante Parallelität in der zeitgleichen Aufgabenwahrnehmung durch Fahrer und System zugunsten einer – gegebenenfalls zeitlich und räumlich begrenzten – eigenständigen maschinellen Fahrzeugsteuerung entfällt. Die zutreffend daher nur noch als „Fahrzeugnutzer“ bezeichnete Person hat zwar im Fall der o. g. Applikation „Autobahnpiilot“ eine als „dominant“ ausgewiesene Eingriffsmöglichkeit in die Fahrzeugsteuerung, die sich grundsätzlich nicht von der in Abschn. 25.4.1 beschriebenen „Autorität“ im Fall von Fahrerassistenzsystemen unterscheidet. Allerdings fehlt es mit einiger Wahrscheinlichkeit an der Grundlage für ihre Ausübung: Sobald sich die Rolle des Fahrers derart verändert, dass nicht nur die Handlungsausführung, sondern auch die eigene Beobachtung der Verkehrssituation und die hierauf beruhende Bewertung maschineller Steuerungsentscheidungen entfällt, wird auch zwangsläufig die Bedeutung dieser „Dominanz“ oder „Autorität“ eingeschränkt sein: Es fehlt auch bei Anwesenheit des Fahrzeugnutzers die Situationswahrnehmung und damit de facto an einer Grundlage für die Ausübung von „Dominanz“ bzw. „Autorität“. Im Fall der beiden Applikationen, die sich durch die räumliche Abwesenheit des Fahrzeugnutzers auszeichnen (s. die stellvertretenden Applikationen „Autonomes Valet-Parken“ und „Vehicle-on-Demand“ in Kap. 2) tritt das Fehlen jeglicher Grundlage für die Ausübung von „Dominanz“ bzw. „Autorität“ noch offensichtlicher zutage.

Das Fehlen einer Grundlage für eine unmittelbare Beobachtung von Verkehrssituationen als Ausgangspunkt einer Fahrzeugsteuerung erlaubt nur den Rückschluss auf eine Eigenständigkeit bzw. „Autonomie“ der maschinellen Steuerung. Die insoweit alles entscheidende Bedeutung der Autonomie maschineller Fahrzeugsteuerung im vorliegenden Zusammenhang hat daher konsequenterweise als adverbiale Bestimmung auch Eingang in den Namen des zugrundeliegenden Projektes gefunden.

25.5 Grundsätzliche Rechtsfragen des autonomen Fahrens

Rechtsfragen im Zusammenhang mit dem autonomen Fahren lassen sich, wie bereits in Abschn. 25.2 ausgeführt, nicht anhand der heutigen Rechtsgrundlagen zufriedenstellend oder erschöpfend beantworten. Dies begründet sich daraus, dass die Rechtsgrundlagen des

Straßenverkehrsrechts bei ihrer Entstehung und Weiterentwicklung bislang nur Erwägungen zugrunde legen konnten, die zum Regelungszeitpunkt regelungsbedürftig waren. Im Bereich des öffentlichen Straßenverkehrs hat sich die Frage autonomer Fahrzeuge bislang nicht gestellt – auch nicht angesichts heute marktverfügbarer Fahrerassistenzsysteme (s. Abschn. 25.4.1): Es war bislang immer davon auszugehen, dass ein Fahrer die Fahrzeugsteuerung mindestens im Sinne der redundant-parallelen Aufgabenwahrnehmung noch ausführt. Zieht man demgegenüber autonomes Fahren in Betracht, liegt darin ein Wechsel von grundlegender Bedeutung hin zur eigenständigen maschinellen Fahrzeugsteuerung.

25.5.1 Automatisierungsrisiko

Für autonome Fahrzeuge wird angenommen, dass „Hardware-Ausfälle und Software-Fehler ... auch bei autonom fahrenden Fahrzeugen auftreten [können]“, wobei diese „nach aktuellem Stand der Technik“ entwickelten Fahrzeuge als „... mindestens so zuverlässig und sicher ... wie es heutige Fahrzeuge sind“ eingestuft werden. Im Weiteren wird aber zugleich deutlich, dass diesbezüglich noch erhebliche Unsicherheit herrscht, da die „Erfolgsquote“ bei der Fahrzeugführung als „ähnlich der menschlichen Qualität und Erfolgsquote“ angenommen wird, dies aber derzeit eine vorsichtige erste Einschätzung von Experten darstellt, die nur als Diskussionsgrundlage für das vorliegende Projekt dient (s. Kap. 2). Tatsächlich kann also die Leistung maschineller Fahrzeugsteuerung heute noch nicht abschließend beurteilt werden; anzunehmen ist aber, dass einerseits ein Automatisierungsrisiko verbleiben wird, dieses andererseits jedoch nicht höher liegt als das resultierende Risiko menschlicher Fahrzeugführung.

25.5.1.1 Das Automatisierungsrisiko vor dem Hintergrund der Grundrechte

Nimmt man dieses somit für möglich gehaltene Automatisierungsrisiko in den Blick und zieht die Situation bezogen auf das Grundrecht auf Leben und körperliche Unversehrtheit im heutigen Straßenverkehr mit heran (s. Abschn. 25.3), wird deutlich, dass der Wandel von menschlich kontrollierter zu eigenständiger, maschineller Fahrzeugsteuerung als „wesentlich für die Verwirklichung der Grundrechte“ angesehen werden dürfte [11]. Aufgrund des erheblichen Eingriffs, den ein solches, neuartiges Automatisierungsrisiko in das Grundrecht auf Leben und körperliche Unversehrtheit bedeuten würde, ist es als wahrscheinlich anzusehen, dass eine Entscheidung über die Ermöglichung autonomer Fahrzeuge und damit über ein eigenständiges maschinelles Automatisierungsrisiko im Straßenverkehr dem Gesetzgeber obliegt. Der Gesetzgeber wäre verpflichtet, die wesentlichen Entscheidungen selbst zu treffen, was sich aus dem Demokratieprinzip und Rechtsstaatsgebot ergibt. Die für die Grundrechtsverwirklichung maßgeblichen Regelungen dürften somit nicht dem Handeln und der Entscheidungsmacht der Exekutive überlassen werden [12]. Diese Argumentation stellt die Neuartigkeit eines solchen Automatisierungsrisikos in den Mittelpunkt, weil hiermit die Fahrzeugsteuerung insgesamt revolutioniert würde. Zugleich ist aber einschränkend festzustellen, dass die realistisch zu erwartende Einführung automa-

tisierter Fahrzeugführung allmählich über die immer weitere Verbesserung bereits heute verfügbarer Fahrerassistenzsysteme „stufenweise“ (s. Kap. 2) erfolgt. Damit wird die Frage aufgeworfen, ob der Wandel hin zu maschineller Fahrzeugsteuerung zum Zeitpunkt der Entscheidung hierüber noch als „wesentlich“ anzusehen sein wird. Das Bundesverfassungsgericht ist mit der Anwendung des Parlamentsvorbehaltes im Rahmen der Grundrechte auf Leben und körperliche Unversehrtheit in der Vergangenheit eher zurückhaltend gewesen und hat es genügen lassen, dass ein fraglicher Typus an Lebensrisiko (im konkreten Fall war die „Brüter-Technologie“ Gegenstand) von dem im Atomgesetz zum Ausdruck kommenden gesetzgeberischen Willen umfasst ist [3], [13]. Auch ist nicht erforderlich, dass die Risiken und Folgen des Straßenverkehrs als solche explizit benannt werden, die die Grundrechte auf Leben und körperliche Unversehrtheit einschränken (sodass sich allein hieraus auch heute keine Verfassungswidrigkeit des Straßenverkehrsgesetzes ableitet) [13]. Es bleibt deshalb die Frage, ob das Straßenverkehrsgesetz in der heutigen Form die neuartige maschinelle Steuerungsqualität umfassen kann. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt (Stand: August 2014) begründet die Neuartigkeit und die Eigenständigkeit der maschinellen Entscheidungsqualität hieran erheblichen Zweifel.

Stellen sich die zugrunde gelegten Annahmen und Bezüge als richtig heraus, wäre die Frage der Ermöglichung eines maschinellen Steuerungsrisikos im öffentlichen Straßenverkehr durch ein formelles Gesetz zu regeln (sogenannter Vorbehalt des Gesetzes). Dem Gesetzgeber stünde es dabei frei, Risiken zuzulassen, die „unterhalb der Gefahrenschwelle“ bleiben und sich deshalb – auch angesichts der Freiheitsausübung des Risikoverursachers – rechtfertigen lassen. Er ist indes nicht hierauf beschränkt und kann auch zur Risikoversorge unterhalb der Gefahrenschwelle tätig werden, soweit dies noch als verfassungsrechtlich verhältnismäßig anzusehen ist [3]. Hinsichtlich des Ausmaßes eines möglichen Automatisierungsrisikos erscheint deshalb – schon aufgrund der Indizwirkung der Situation im heutigen Straßenverkehr – eine Sicherheit und damit auch Regelungsbefugnis des Gesetzgebers durchaus realistisch, die sich im Bereich bewegt, der „mindestens so zuverlässig und sicher ist, wie es heutige Fahrzeuge sind“ (s. Kap. 2).

25.5.1.2 Haftung des Produktherstellers für die eigenständig wirkende automatisierte Fahrzeugsteuerung?

Die Produkthaftung des Herstellers bei vollautomatisierten Systemen (zur Einordnung der vorliegenden Use-Cases als „vollautomatisiert“ s. Kap. 2) könnte wesentlich durch den seitens des Herstellers intendierten Gebrauch des Produktes bestimmt werden. Soweit Systemfunktionen – wie im Fall der Vollautomatisierung – keine notwendige Rolle des Fahrers bei der Fahrzeugsteuerung mehr vorsehen, könnte sich im Rückschluss ergeben, dass die Annahme eines Anscheinsbeweises im Fall eines Unfallschadens solcher Fahrzeuge naheliegt: Tritt während einer maschinell gesteuerten Fahrt ein (Unfall-)Schaden auf, stellt sich die Frage, ob dies auf einen kausal zugrunde liegenden Produktfehler schließen lässt (soweit die relevante Ursache dieses Schadens nicht in einem Eingreifen des Fahrers in Form einer Übersteuerungshandlung oder einem allein ursächlichen Fehlverhalten eines anderen Verkehrsteilnehmers liegt – alles im Rahmen der geltenden Darlegungs- und

Beweislast in Zivilverfahren) [10]. Entscheidend wäre im Ergebnis, ob eine fehlerhafte maschinelle Steuerungsentscheidung letztlich als Produktfehler einzuordnen ist und es so in praktisch allen Fällen fehlerhafter Steuerung zur Annahme einer zivilrechtlichen Haftung des Herstellers kommen könnte.

Damit würden – neben dem Fahrzeughalter (vgl. dazu [10]) – letztlich (fast) immer die Hersteller das zivilrechtliche Haftungsrisiko für das mit maschinellem Wirken verbundene Automatisierungsrisiko tragen. Angesichts der erweiterten Einflussmöglichkeiten einer maschinellen Fahrzeugsteuerung (s. hierzu vertiefend Abschn. 25.5.2) würde sich der Anwendungsbereich für steuerungsrelevante Fehler gegenüber einem Fahrer sogar noch ausweiten.

Hier ist allerdings kritisch zu hinterfragen, ob dieser Rückschluss richtig ist: Die Argumentation folgt in weiten Teilen der Annahme, dass die Ursache von Unfällen heute regelmäßig auf fehlerhafte fahrerische Steuerungsentscheidungen zurückzuführen ist. Die (zukünftig gegebenenfalls maschinelle) Fahrzeugsteuerung stellt aber möglicherweise nur eine von mehreren relevanten Unfallursachen dar.

Das heutige Straßenverkehrsrecht scheint noch immer durch ein anderes Grundverständnis geprägt. Deutlich wird dies etwa in der aktuellen Fassung des Straßenverkehrsgesetzes, das von der Existenz „unabwendbarer Ereignisse“ ausgeht (diese sind heute in § 17 Abs. 3 Straßenverkehrsgesetz bei der Zuordnung von Schadensverursachungsanteilen zwischen Kraftfahrzeugen weiterhin von Bedeutung). Dabei ist aber hervorzuheben, dass die heute hierunter zu fassenden Fälle im streng naturwissenschaftlichen Sinn und unter Berücksichtigung des heutigen Standes der Technik voraussichtlich nur teilweise als „unabwendbar“ zu qualifizieren sein werden. Dennoch wird das Verständnis dieses juristischen Begriffs bis heute nur insoweit eingeschränkt, als „äußerste mögliche Sorgfalt“ und das „Verhalten eines ‚Idealfahrers‘“ im Sinne durchschnittlicher Verhaltensanforderungen (und in Abgrenzung zum gedachten „Superfahrer“) hierfür genügen [14]. (Erkennbar liegt hier aber ein anderer Gedanke zugrunde: die Frage nach dem Verschulden eines Unfalls, nicht naturwissenschaftliche Kausalität seines Auftretens.)

Die konsequente Anwendung der Frage nach naturwissenschaftlicher Kausalität könnte bedeuten, dass gegebenenfalls nur eine Teilmenge von Schäden, die während automatisierter Fahrzeugsteuerung auftreten, tatsächlich auf eine fehlerhafte Steuerung (oder einen sonstigen Produktfehler) zurückzuführen sein wird. Dies würde im Ergebnis den oben dargestellten Rückschluss von einem Schaden auf das Vorliegen eines Produktfehlers während automatisierter Steuerung grundlegend infrage stellen. Die offene Frage in diesem Zusammenhang lautet deshalb, inwieweit das heutige „Verkehrssystem Straße“ eine eigenständig relevante Ursache für Unfallschäden (gegenüber gegebenenfalls maschinellen Steuerungsentscheidungen) darstellt.

25.5.2 „Dilemma-Situationen“

Der einprägsame Begriff der „Dilemma-Situation“ beinhaltet im Rahmen der rechtlichen Diskussion zunächst gleich zwei aufeinander aufbauende relevante Aspekte, die charakte-

ristische Merkmale eines maschinellen Wirkens pointiert beschreiben und für den Extremfall die Konsequenzen eines solchen Wandels mit einmaliger Klarheit aufzeigen können: Diese sind erstens die Erweiterung der Einflussmöglichkeit von Fahrzeugsteuerung in zeitkritischen Situationen und zweitens die Frage nach der Umsetzung einer maschinellen Steuerungsentscheidung im grundrechtsrelevanten Bereich.

Zunächst muss grundlegend die Existenz von „Dilemma-Situationen“ im Straßenverkehr infrage gestellt werden. Unklar erscheint insbesondere, ob das zugrunde liegende gedankliche Modell anderweitiger Alternativlosigkeit trägt: Im Straßenverkehr treten im Einzelfall vielfältige, nacheinander geschaltete und stark situationsabhängige Einflussmöglichkeiten bei der Fahrzeugsteuerung auf. Vorangehende alternative Steuerungsentscheidungen im Straßenverkehr bieten somit – möglicherweise, dies wäre näher zu untersuchen – die Möglichkeit, auf das Zustandekommen einer alternativlosen Situation, die zwangsläufig zu einem Schaden führt, Einfluss zu nehmen. Es erscheint nicht ausgeschlossen, durch ein vorausschauendes Steuerungsverhalten alternativlose Situationen von vornherein zu vermeiden. Umgekehrt kann sich aber auch ergeben, dass bestimmte Gefahren des Straßenverkehrs auf seine prägenden Merkmale zurückzuführen und nicht vermeidbar sind (beispielsweise auf die Vielfalt möglicher Interaktion von unterschiedlich geschützten Verkehrsteilnehmern). Dann ist im Ausnahmefall aber auch die Koinzidenz von zwei möglichen Schädigungen denkbar und die Befassung mit „Dilemma-Situationen“ notwendig. In juristischen Kategorien wird hier die – naturwissenschaftlich zu bestimmende – Frage nach relevanten Unfallursachen sowohl hinsichtlich interner (fahrzeugsteuerungsabhängiger) als auch externer (verkehrssystemabhängiger) Faktoren kritisch hinterfragt.

Unabhängig vom Ergebnis dieser theoretischen Betrachtung von Fahrzeugsteuerung im Straßenverkehr ergeben sich in rechtlicher Hinsicht diskussionswürdige Aspekte: So kann anhand von „Dilemma-Situationen“ der grundrechtliche Rahmen für maschinelle Steuerungsentscheidungen autonomer Fahrzeuge aufgezeigt werden. Legt man die Existenz von „Dilemma-Situationen“ zugrunde, ergibt sich darüber hinaus, dass eine Beschränkung der Herstellerverantwortung in diesen Fällen geboten sein könnte, weil Schädigungen sich dann durch Steuerungshandlungen als ebenso unvermeidbar erweisen würden, wie sie es im Fall der Existenz eigenständiger Risiken des „Verkehrssystems Straße“ wären (s. Abschn. 25.5.1).

Schließlich ist darauf hinzuweisen, dass „Dilemma-Situationen“ auch der Diskussion ethischer Aspekte in verschiedenen Ausprägungen zugrunde gelegt werden, wobei sie auch dort der Pointierung und damit Bearbeitung der übergeordneten ethischen Fragestellung dienen (s. Kap. 4).

25.5.2.1 Erweiterung der Einflussmöglichkeit

Das gedankliche Modell der „Dilemma-Situation“ für autonome Fahrzeuge legt zunächst als Arbeitshypothese zugrunde, dass bestimmte, gesteigert unfallnahe Situationen durch den Einsatz maschineller Fahrzeugsteuerung noch beeinflusst werden könnten: In vielen Fällen könnte es dadurch möglich sein, heute als konkret gefährdet anzusehende Rechtsgüter in buchstäblich letzter Sekunde zu „retten“. Diese Situationen bedürfen nach heutigem Stand der Technik (bei allein menschlicher Fahrzeugsteuerung) immer der Berück-

sichtigung einer Reaktionszeit des Fahrers [14]. Die hierdurch verzögerte Steuerungshandlung kann einzelfallabhängig das Auftreten eines Unfalls oder seine Folgen beeinflussen. Tatsächlich erscheint diese Arbeitshypothese im Zusammenhang mit einem Wandel hin zu maschinellen Steuerungsentscheidungen keineswegs abwegig. Es ließe sich zudem noch annehmen, dass ein weiterer Vorteil dadurch erreicht werden kann, dass alternative Steuerungsmöglichkeiten (wie beispielsweise das Ausweichen anstelle des Bremsens vor einem konkret gefährdeten Fußgänger, was dem Durchschnittsfahrer selten gelingt [15]) von einer maschinellen Steuerung mitberücksichtigt werden können. Eine wesentliche, den „Dilemma-Situationen“ zugrunde liegende Arbeitshypothese lautet deshalb, dass die maschinelle Fahrzeugsteuerung potenziell zur Kontrolle von bislang nicht oder nur verzögert beherrschten Verkehrssituationen führt.

25.5.2.2 Die automatisierte Steuerungsentscheidung

Die hierauf aufbauende weitere Annahme im gedanklichen Modell der „Dilemma-Situation“ berücksichtigt die neuartige maschinelle „Entscheidungsqualität“ einer autonomen Fahrzeugsteuerung. Diese Sichtweise kommt ausdrücklich in der Bezeichnung des „Fahrroboters“ als „Subjekt“ zum Ausdruck, die sich – mit aller in dieser Hinsicht gebotenen Vorsicht – in den grundlegenden Definitionen des vorliegenden Projektes äußert (s. Kap. 2). Um diesen Effekt pointiert hervorzuheben und die ethische Dimension einer maschinellen Steuerungsentscheidung zu argumentieren, erfolgt unter Hinzunahme eines Entscheidungsdilemmas die – in der Natur eines Dilemmas liegende anderweitig ausweglose – Zuspitzung. Eine solche Zuspitzung ist nicht als völlig unrealistisch anzusehen und schon deshalb unbedingt diskussionswürdig, weil es um die gesellschaftliche Akzeptanz einer weitreichenden maschinellen Entscheidungsqualität geht, die hierdurch in den Mittelpunkt gerückt wird. Diese maschinelle Entscheidung kann im Einzelfall – wie in den „Dilemma-Situationen“ konstruiert – das Recht des (konkret gefährdeten) Einzelnen auf Leben und körperliche Unversehrtheit betreffen und liegt insoweit grundsätzlich nicht anders als im Fall der grundrechtsrelevanten Gefahren im heutigen Straßenverkehr (s. hierzu Abschn. 25.3). Der wesentliche Unterschied liegt einzig in der zugrunde liegenden maschinellen Steuerung.

25.5.2.3 Kritische Analyse der „Dilemma-Situation“

Man wird bei einer theoretischen Aufarbeitung möglicher Konsequenzen maschineller Steuerungsentscheidungen der Sache nur gerecht, wenn auch darauf hingewiesen wird, dass die „Dilemma-Situation“ in Gestalt des „Entscheidungsdilemmas“, soweit es überhaupt existiert, die absolute Ausnahme darstellen wird. Für eine sachliche Einordnung ist deshalb einleitend darauf hinzuweisen, dass es sich von vornherein nur um eine sehr seltene Ausnahmesituation handeln kann.

Die dem Dilemma zugrunde liegende Annahme ist, dass keine Alternative zur Schädigung von zwei im Wesentlichen gleichrangigen Rechtsgütern im konkreten Einzelfall denkbar ist, obwohl die maschinelle Fahrzeugsteuerung alle alternativ möglichen Steuerungsentscheidungen berücksichtigt hat. Wenn aber in der konkreten Situation – unter

Beachtung des Steuerungsverhaltens vor Konkretisierung der Gefahr – keine Alternative zur Schädigung verbliebe, können gleichwohl relevante alternative Ursachen als das Steuerungsverhalten in der vorgelagerten Kausalkette in Betracht gezogen werden. So erscheint es etwa plausibel anzunehmen, dass Gefahren möglicherweise nicht allein in der Fahrzeugsteuerung liegen, sondern dem Straßenverkehr als solchem innewohnen können und somit bereits auf die in Abschn. 25.3 beschriebene Komplexität und Vielfalt möglicher Situationen im „Verkehrssystem Straße“ zurückzuführen sind. Dies erscheint insbesondere dann wahrscheinlich, wenn man beispielsweise den Einfluss der Fahrgeschwindigkeit berücksichtigt, deren Höhe voraussichtlich in den meisten Fällen eine notwendige Ursache (im naturwissenschaftlichen Sinn) bei dem Zustandekommen von Verkehrsunfällen darstellen wird. Die „normale“ Fahrgeschwindigkeit ist aber zugleich Bestandteil des heutigen Verständnisses vom „Verkehrssystem Straße“ und bestimmt in weiten Teilen sein Gepräge. Das Bild vom heutigen Straßenverkehr erscheint im Einzelfall durchaus risikobehaftet: So ist durchaus zu hinterfragen, ob in einzelnen Situationen – wie beispielsweise im Fall der Vorbeifahrt an einem Fußgänger – ein Risiko liegt [16], das angepasst werden könnte, um bestehenden Unfallrisiken im Straßenverkehr zu begegnen.

25.5.2.4 „Dilemma-Situationen“ vor dem Hintergrund der Grundrechte

Die rechtliche Bewertung von „Dilemma-Situationen“ sollte konsequent in den übergeordneten rechtlichen Rahmenbedingungen, den Grundrechten, ihren Ausgangspunkt nehmen. Im Bereich des Grundrechtes auf Leben und körperliche Unversehrtheit ändert sich durch den Wandel von menschlicher Fahrzeugsteuerung zu maschinellm Wirken nichts von grundlegender Bedeutung: Es kommt insbesondere nicht zu einem „gezielten“ Eingriff in das Leben oder die körperliche Unversehrtheit, der aufgrund der Bedeutung dieser Rechtsgüter als Höchstwert bzw. ihrer fundamentalen Bedeutung praktisch nicht zu rechtfertigen wäre [3]. Zwar ist, wie noch im Zusammenhang mit der Produkthaftung zu diskutieren sein wird, jede Steuerungsentscheidung durch die Programmierung des entsprechenden Systems unter bestimmten Randbedingungen vorgegeben und somit letztlich nicht zufällig, allerdings handelt es sich dabei gerade nicht um die Konkretisierung eines *bestimmten* Handlungsablaufes. Die Programmierung einer autonomen Fahrfunktion gibt vielmehr (nur) vor, welche Gesichtspunkte zu berücksichtigen sind, sodass hieraus unter mehreren Alternativen diejenige gewählt werden kann, die einen Schaden nach Möglichkeit ganz vermeidet oder den geringsten Schaden verursacht. Gerade in dieser situationsabhängigen Berücksichtigung von Handlungsalternativen liegt der entscheidende Mehrwert einer maschinellen Fahrzeugsteuerung, die in Abschn. 25.5.2.1 als „Erweiterung der Einflussmöglichkeit“ durch maschinelle Steuerung beschrieben wurde. Damit werden aber im Rahmen der Programmierung keine Steuerungsentscheidungen getroffen, sondern (nur) abstrakte Kriterien für die einzelfallbezogene Steuerungsentscheidung vorgegeben. Hieraus wird deutlich, dass es sich letztlich weiterhin um ein abstraktes Risiko handelt, das eine maschinelle Steuerung im Straßenverkehr bedeutet. Sie wäre deshalb vor dem Hintergrund der Grundrechte nicht anders zu behandeln als eine menschliche Fahrzeugsteuerung auch, die die bereits in Abschn. 25.3 dargestellten Risiken birgt. Somit sind die hiermit einherge-

henden unbeabsichtigten Schutzgutverletzungen (vgl. [3]), die Unfälle unter maschineller Fahrzeugsteuerung im Straßenverkehr ebenso herbeiführen, wenn man vom Vorliegen eines Automatisierungsrisikos ausgeht (s. Abschn. 25.5.1), vor dem Hintergrund des Grundrechtes auf Leben und körperliche Unversehrtheit nicht anders zu beurteilen als heutige Risiken im Straßenverkehr auch.

Ein Gesichtspunkt sollte aus grundrechtlicher Sicht allerdings besondere Berücksichtigung finden: Soweit sich ergibt, dass die maschinelle Umfelderkennung ausreicht, um nichtmotorisierte Verkehrsteilnehmer (Fußgänger und Radfahrer) als solche zu erkennen, wäre ihr Schutz im Rahmen sich ergebender Handlungsvarianten besonders zu berücksichtigen (s. Argumentation in Abschn. 25.3).

Das mit dem Begriff der „Dilemma-Situation“ beschriebene Entscheidungsdilemma zwischen zwei gleichwertigen Rechtsgütern lässt sich indes vor dem Hintergrund des Grundrechtes auf Leben und körperliche Unversehrtheit nicht auflösen: Eine Abwägung mit dem gleichwertigen und im Fall des Lebens als verfassungsrechtlicher „Höchstwert“ geschütztes [3] Grundrecht anderer Grundrechtsträger hat zu unterbleiben und ist unzulässig. Aus rechtlicher Sicht kann deshalb – geht man von der Existenz solcher „Dilemma-Situationen“ in der Realität aus – kein Beitrag im Sinne einer Entscheidung ausgehend vom heutigem Stand der Grundrechtsdogmatik erfolgen, vielmehr würde eine lösungsbedürftige, neuartige Frage aufgeworfen. Von Bedeutung wäre darum, die Frage danach zu klären, ob „Dilemma-Situationen“ tatsächlich in dieser Weise auftreten, also insbesondere, ob die relevante Ursache ihrer Entstehung tatsächlich auf die maschinelle Steuerungsentscheidung zurückzuführen ist und nicht auf ein inhärentes Risiko des „Verkehrssystems Straße“ – beispielsweise aufgrund der dort gefahrenen Geschwindigkeiten in bestimmten Situationen (s. hierzu bereits Abschn. 25.5.2.3). Sollte sich ergeben, dass „Dilemma-Situationen“ existieren und in maschineller Steuerung ihre relevante Ursache finden, würde es sich um eine Frage handeln, die transparent gemacht und – gesellschaftliche Akzeptanz eines Automatisierungsrisikos vorausgesetzt – diskutiert werden müsste. Notwendig wäre dann voraussichtlich die Erstellung eines Kataloges mit anerkannten Entscheidungskriterien für solche Situationen.

Bei alledem wäre zu berücksichtigen, dass die Frage erst durch die Erweiterung der Einflussmöglichkeit aufkommt (s. Abschn. 25.5.2.1), die in den allermeisten Fällen ohne „Dilemma“ zu einer Verbesserung gegenüber der heutigen Ausgangssituation führt: Der naturwissenschaftliche Vergleich des maschinellen Entscheidungsdilemmas mit dem Fahrer heute wird voraussichtlich nämlich ergeben, dass diesem in der ansonsten gleichen Situation – schon aufgrund der zusätzlich zuzugestehenden Schreckzeit (vgl. [14]) – heute kein Schuldvorwurf gemacht wird. Auch kommt es in „Dilemma-Situationen“ unterschiedslos im Fall eines menschlichen Fahrers wie im Fall maschinellen Wirkens letztlich zu einer Schädigung. Der Grund für die Befassung mit der Frage wäre deshalb auf die grundsätzlich erfreuliche Entwicklung zurückzuführen, dass derartige Situationen aufgrund technischer Entwicklung beeinflussbar geworden wären und so regelmäßig die Rettung konkret gefährdeter Rechtsgüter ermöglicht wird. Dem Gewicht dieses Arguments wird man sich voraussichtlich nicht verschließen können.

25.5.3 Möglichkeit zur Übersteuerung durch die Passagiere

Die Frage der Übersteuerungsmöglichkeit von Fahrzeugen resultiert aus der in der Vergangenheit geführten Diskussion zu Fahrerassistenzsystemen, die im Wesentlichen ihren Ausgangspunkt in den nach aktuellem Stand (August 2014) noch gültigen konkreten Formulierungen des Wiener Übereinkommens über den Straßenverkehr von 1968 nimmt [17]. Auch wenn dies nicht konkret angesprochen wurde, ist dieser Grundgedanke zugleich verwandt mit der Frage nach den Pflichten des Fahrers bei vollautomatisierter Fahrzeugführung, die in Bezug auf das geltende Verhaltensrecht in Deutschland als widersprüchlich beschrieben worden ist [10]. Der Zusammenhang lässt sich anhand des Begriffes der „Dominanz“ bzw. „Autorität“ beschreiben, der im Rahmen des vorliegenden Projektes den „Use-Cases“ (s. Kap. 2) zugrunde gelegt wurde: Alle vier stellvertretenden Applikationen sehen einen Einfluss des Fahrers bzw. Passagiers auf die Fahrzeugsteuerung vor, der mit zunehmender Reichweite der Autonomie immer weiter zurücktritt, da anderen Instanzen im Rahmen der Funktionsumsetzung Vorrang einzuräumen ist. Bereits die vorliegend betrachtete Stellvertreterapplikation mit der geringsten Autonomie, der „Autobahnautomat mit Verfügbarkeitsfahrer – Autobahnpilot“ sieht aber vor, dass der Fahrer „... während der autonomen Fahrt zum einfachen Passagier ...“ wird, sodass er „... einer anderen Tätigkeit nachgehen [kann]“. Hierdurch fehlt es bereits vollständig an einer Grundlage für die jederzeitige Übersteuerungsmöglichkeit, die von vornherein immer faktisch (und nicht nur technisch) für notwendig erachtet worden ist. Die faktische Übersteuerungsmöglichkeit des Fahrers war eine Umschreibung für die bei Fahrerassistenzsystemen seinerzeit noch nicht infrage gestellte „Letztentscheidungsbefugnis des Fahrers“ und damit die untergeordnete Rolle von Fahrerassistenzsystemen gegenüber dem Fahrer bei der Fahrzeugsteuerung, die nur eine abgeleitete Handlungs- und Entscheidungsbefugnis des Systems für möglich hielt (s. Abschn. 25.4.1). Autonome Fahrzeuge stellen diese Situation gänzlich infrage, sodass es nicht sinnvoll erscheint, aus Vorschriften, die einen menschlichen Fahrer bei der Fahrzeugsteuerung zugrunde legen, Ableitungen zu treffen, die Wirkung für die Zukunft entfalten. Dieser grundlegende Wandel zum eigenständigen maschinellen Wirken ist bereits in Abschn. 25.4.2 beschrieben.

Mit Blick auf die Grundrechte lässt sich in diesem Zusammenhang allerdings in aller gebotenen Kürze auf einen Aspekt hinweisen: Die in Art. 2 GG normierten Freiheitsrechte von Passagieren autonomer Fahrzeuge stellen den großen Rahmen dar, der – soweit vorliegend von Relevanz – sich insbesondere auf die Freiheit zur körperlichen Fortbewegung und die freie Entfaltung der Persönlichkeit bezieht (vgl. [3]). Die sich hieraus ergebenden Einschränkungen der Freiheitsausübung scheinen nach aktuellem Stand der Diskussion jedoch nicht grundlegend infrage gestellt, solange den Passagieren autonomer Fahrzeuge stets die Möglichkeit zur Verfügung steht, ein Anhalten des Fahrzeuges an der nächsten sicheren und geeigneten Stelle zu veranlassen.

25.5.4 Fehlerkompensationsfähigkeit beim autonomen Fahren

Eine „grundlegende Annahme“ des vorliegenden Projektes liegt darin, „dass die Use-Cases im Betrachtungszeitraum in einem Mischbetrieb aus Verkehrsmitteln mit unterschiedlichen Automatisierungsgraden ... von „driver only“ über „assistiert“ bis „vollautomatisiert“ ... eingesetzt werden“ (s. Kap. 2). Insofern ist zu fordern, dass sich autonome Fahrzeuge in das bestehende Verkehrssystem einfügen.

Im Fall herkömmlicher Fahrzeugführung ist, wie auch im Fall der Verwendung heute verfügbarer Fahrerassistenzsysteme (im weiteren Sinn), denen niemals eine eigenständige Handlungsqualität zukommt (s. Abschn. 25.4.1), die Straßenverkehrsordnung uneingeschränkt anwendbar. Der Fahrer bewegt sich demnach heute im Spannungsfeld zwischen „Vertrauensgrundsatz“ und „defensiver Fahrweise“: Der „Vertrauensgrundsatz“ besagt, dass der sich selbst verkehrsrichtig verhaltende Verkehrsteilnehmer unter normalen Verhältnissen nicht vorsorglich alle möglichen (seltenen) Verkehrsverstöße anderer Verkehrsteilnehmer in Erwägung ziehen muss. Der „Vertrauensgrundsatz“ ist notwendig, um den Verkehrsfluss aufrecht zu erhalten. Zugleich soll der Fahrer heute „defensiv fahren“ (um der Verkehrssicherheit Rechnung zu tragen) und somit mehr als die gebotene Sorgfalt anwenden (was einen teilweisen Verzicht auf Vertrauen in verkehrsrichtiges Verhalten anderer bedeutet), ohne dass dies jedoch den Vertrauensgrundsatz „grundsätzlich“ infrage stellt [14]. Wie diese Anforderungen im Einzelfall, also in Bezug auf den Fahrer in bestimmten Verkehrssituationen verstanden werden, ließe sich in Deutschland aus Urteilen ableiten, wobei die kontinental-europäische Ausrichtung auf systematisiertes Gesetzesrecht allenfalls eine Orientierung in dieser Hinsicht erlaubt, aber kein Präjudiz für den konkreten Einzelfall bedeutet, sodass der Wert einer solchen Zusammenstellung als eher gering einzuschätzen ist.

Von autonomen Fahrzeugen, die sich im „Mischbetrieb“ bewegen, wird im Ergebnis zu fordern sein, dass sie (mindestens) denselben Anforderungen genügen, die auch der Fahrer erfüllen soll – schon um hierdurch keine neuen Gefahren zu verursachen. Bei der präzisen Beschreibung der Anforderungen an eine Fehlerkompensationsfähigkeit ist jedoch festzustellen, dass eine erhebliche Unschärfe verbleibt. Überträgt man deshalb die heutigen rechtlichen Anforderungen im Straßenverkehr in eine Leistungsdefinition einer autonomen Steuerungsfunktion, lässt sich mit ausreichender Sicherheit nur festhalten, dass Fehlerkompensationsfähigkeiten autonomer Fahrzeuge grundsätzlich erforderlich sind: Autonome Fahrzeuge müssten eindeutig erkennbares Fehlverhalten anderer Verkehrsteilnehmer im Rahmen der Fahrzeugsteuerung berücksichtigen und die maschinelle Steuerung hieran anpassen. Wie dies konkret zu geschehen hat, wird nach heutigem Recht im Einzelfall der Einschätzung des Fahrers überlassen. Allein diese Anforderung technisch umzusetzen, würde eine hohe Leistungsfähigkeit der Umfelderkennung und ausgesprochen komplexe Abwägungsvorgänge voraussetzen; sie werden allerdings – auch im Fall des Fahrers – nicht näher definiert, sondern grundsätzlich im Rahmen der geforderten Fahreignung und Fahrbefähigung von Fahrern vorausgesetzt [18]. Die fehlende Konkretisierung der Anforderungen kann sich deshalb als zu anspruchsvoll für die Umsetzung als maschinelle Steuerung erweisen.

Angesichts resultierender Unsicherheit durch die antagonistische Forderung „defensiven Fahrens“ bleibt somit vorerst nur die – den Verkehrsfluss möglicherweise infrage stellende – Übererfüllung von Fehlerkompensationsfähigkeit im Sinne eines Risikoausschlusses. Dabei bleibt allerdings die Frage offen, ob tatsächlich mit einer erheblichen Einschränkung des Verkehrsflusses zu rechnen ist: Durch die oben dargelegte Erweiterung der Einflussmöglichkeit maschineller Steuerung (s. Abschn. 25.5.2) könnten sich maschinelle Fahrzeugsteuerungen gegenüber dem Fahrer als deutlich leistungsfähiger erweisen. Dieser Vorteil, der derzeit nicht zu bemessen ist, könnte Nachteile für den Verkehrsfluss ausgleichen (wobei der resultierende Umfang ebenso offen bleibt).

In der Frage von Fehlerkompensationsfähigkeiten autonomer maschineller Steuerungssysteme könnte es sich zur Verbesserung der Rechtssicherheit als sinnvoll erweisen, einheitliche, hinsichtlich des Zieles definierte Anforderungen (vergleichbar mit Wirkvorschriften etwa im Bereich von Fahrzeugbremsen) zu formulieren, die den Stand von Wissenschaft und Technik niederlegen und harmonisieren. Ein solcher Leistungskatalog dürfte bei der juristischen Bestimmung von realistischen Leistungsanforderungen an autonome Steuerungssysteme Wirkung entfalten.

25.5.5 Kommunikation im Straßenverkehr

Hinsichtlich der Kommunikation ist für den Straßenverkehr von den heute bestehenden Möglichkeiten auszugehen. Der Gebrauch einiger fahrzeugseitiger Licht- und Schallzeichen – wie die (Licht-)Hupe, der Fahrtrichtungsanzeiger oder die Warnblinkanlage – wird von der StVO, soweit vorhanden, ausdrücklich vorausgesetzt. So sind beispielsweise Warnzeichen (Gebrauch des Warnblinklichts) im Fall von Gefahren bei Schulbussen, wenn Fahrgäste ein- oder aussteigen oder als Warnung im Fall der Annäherung an ein Stauende, dem Liegenbleiben defekter Fahrzeuge und dem Abschleppen vorgesehen (vgl. §§ 15, 15a, 16 Straßenverkehrsordnung). Die Verwendung von Fahrtrichtungsanzeiger und (Licht-)Hupe ist durch § 5 Abs. 4a und 5 Straßenverkehrsordnung im Rahmen eines Überholvorgangs angeordnet bzw. zugelassen. Der Gebrauch des Fahrtrichtungsanzeigers beim Abbiegen (§ 9 Abs. 1 Straßenverkehrsordnung) oder Anfahren (§ 10 Straßenverkehrsordnung) ist, soweit vorhanden, vorgeschrieben. Über diese normativ formalisierte Kommunikation erreicht die Straßenverkehrsordnung eine Erwartungserleichterung bei anderen Verkehrsteilnehmern [19].

Daneben hat sich eine informelle (oder rechtlich nicht abgesicherte) Verwendung von (Licht-)Zeichen eingebürgert, die allerdings nicht durch die Straßenverkehrsordnung vorgesehen ist (so kann in Deutschland die Lichthupe auch als Vorfahrtsverzicht aufzufassen sein). Hierbei ist allerdings anzumerken, dass eine solche Zeichenverwendung bereits nicht mehr dem Schutz des Vertrauensgrundsatzes im Straßenverkehr unterliegt, weil sie nicht als „verkehrsrichtiges“ Verhalten eingeordnet werden kann (und im Übrigen einer erheblichen Gefahr der Fehlinterpretation unterliegt).

Die unmittelbare verbale Kommunikation aus geschlossenen Fahrzeugen im Straßenverkehr wird erschwert, wenn nicht unmöglich gemacht durch die physische Trennung des

Fahrers von der Umwelt und den Lärmpegel der Umgebung. Auch die informelle Verständigung über einfache Gesten ist aufgrund von Spiegelungseffekten bei den heute üblichen getönten und geneigten Fahrzeugscheiben deutlich eingeschränkt. Dennoch lässt sich auch der Straßenverkehrsordnung im Fall „besonderer Verkehrslagen“ eine Anwendungsbestimmung entnehmen, die nicht näher bestimmte informelle Kommunikation vorsieht (als spezialgesetzliche Ausprägung des Vorsichts- und Rücksichtnahmegebotes des § 1 Abs. 1 Straßenverkehrsordnung): So ist bei erforderlichem Vorfahrtsverzicht eine Verständigung mit dem Verzichtenden im Rahmen von § 11 Abs. 3 Straßenverkehrsordnung erforderlich, die allerdings voraussetzt, dass diese Verständigung eindeutig erfolgt – hier kann sogar im Ausnahmefall die Lichthupe unterstützend wirken [14].

Angesichts bestehender Herausforderungen bei der Kommunikation (s. auch Kap. 7) kann auch ein vorwegnehmendes Handeln, insbesondere dann, wenn es sich in Bewegung ausdrückt, ein Zeichen für die intendierten Zielhandlungen sein [19], sodass auch dem von außen wahrnehmbaren Verhalten im Straßenverkehr wie dem Anhalten, Abbremsen und Anfahren erhebliche Bedeutung im Rahmen der informellen Kommunikation zukommt. Ausdrücklich vorgesehen wird solches Verhalten beispielsweise auch durch § 8 Abs. 2 StVO, wonach dem im Rahmen einer Vorfahrtsregelung Wartepflichtigen aufgegeben wird, durch sein „... Fahrverhalten ... erkennen [zu] lassen, dass erwartet wird.“

Neben der Nonverbalität und Anonymität wird insbesondere auch die Komplexität der Situation als charakteristische Randbedingung für die Kommunikation im Straßenverkehr beschrieben. Diese Komplexität ist insbesondere durch die Schnelligkeit und Flüchtigkeit der Kommunikation im Straßenverkehr bestimmt [20].

Daraus lassen sich erste wichtige Schlussfolgerungen für das autonome Fahren ableiten: Während die normierte, formelle Kommunikation sich möglicherweise nur als eine Herausforderung für die maschinelle Wahrnehmung und Interpretation darstellt und sich eventuell in der umgekehrten Richtung noch maschinell programmieren lässt, ist hier bereits als Frage aufzuwerfen, inwieweit für andere Fahrer überhaupt Erkennbarkeit maschineller Steuerung gegeben ist oder sich umsetzen ließe. Als Folge stellt sich im „gemischten“ Kommunikationsverhältnis mit Maschinen die Frage, ob andere Fahrer auf den Inhalt erfolgter formeller Kommunikation vertrauen. Das setzt mindestens Kenntnis von diesbezüglichen Fähigkeiten autonomer Fahrzeuge voraus, damit kommunikative Interaktion funktioniert. Gegebenenfalls ergibt sich sogar ein Bedürfnis anderer Verkehrsteilnehmer, die Inhalte maschineller Kommunikation auch im Nachhinein (beispielsweise nach einem Unfall) noch nachvollziehen zu können, um die Bereitschaft aufzubringen, auf maschinelle Kommunikationsinhalte zu vertrauen.

Während die sich ergebenden Herausforderungen im Fall der formellen Kommunikation noch lösbar erscheinen, ist informelle Kommunikation im Mischverkehr von nochmals größeren Herausforderungen geprägt (Mischverkehr liegt der vorliegenden Betrachtung insgesamt zugrunde (s. Kap. 2). Es ergibt sich in diesem Bereich ein Bedürfnis, zu Lösungsansätzen zu kommen, die eine kommunikative Brücke zwischen maschinell gesteuerten Fahrzeugen und den übrigen Verkehrsteilnehmern vermitteln. Letztlich liegt diesem Konflikt die bereits in Abschn. 25.5 beschriebene Ursache zugrunde, dass eine ins Einzelne

gehende Regelung von Kommunikationsverhalten bei menschlichen Fahrern im Straßenverkehr nicht zwingend erforderlich ist und die Umsetzung den Verkehrsteilnehmern im Einzelnen überlassen bleiben kann. Diese informelle Kommunikation zwischen Verkehrsteilnehmern mag zwar konfliktrichtig und verbesserungsbedürftig sein [20], dennoch ist anzunehmen, dass Fahrer regelmäßig zur Lösung dieser Herausforderung in allen Situationen in der Lage sind – zumal dies erst die im Straßenverkehr erforderliche situationsindividuelle Anpassung garantiert. Bei Einführung einer maschinellen Fahrzeugsteuerung fehlt den Maschinen diese den Menschen eigene Fähigkeit, eine nicht näher spezifizierte Verständigung herbeizuführen, gegebenenfalls fehlt es bereits an der maschinellen Wahrnehmungsfähigkeit, die Notwendigkeit von Kommunikation überhaupt zu erkennen: Voraussetzung menschlicher Kommunikation ist das Herstellen einer reflexiven Aufmerksamkeit der Kommunikationspartner und Wahrnehmung untereinander [19]. Hier zeigt sich deutlich, dass die „gemischte“ Kommunikation noch grundlegender Ansätze zur Überbrückung dieser kommunikativen Kluft mit Maschinen erfordert. Auch dürfte dies eine Grundvoraussetzung für das Funktionieren eines gemischt fahrerisch und maschinell gesteuerten Straßenverkehrs sein.

Gleichwohl lässt sich für die Realisierung autonomen Fahrens die Bedeutung von Kommunikation danach abstufen, in welchen Situationen vor allem die für eine technische Umsetzung sehr herausfordernd erscheinende informelle Kommunikation von Gewicht ist: Die oben beschriebene Schnelligkeit und Flüchtigkeit der Kommunikation im Straßenverkehr dürfte sich wesentlich nach Umgebungsbedingungen und Fahrgeschwindigkeiten unterscheiden. Einfach strukturierte, extrem flüchtige Umgebungsbedingungen wie auf einer Autobahn, die schon aufgrund der gefahrenen Geschwindigkeiten die weitgehende Verwendung formeller Kommunikation erfordern, könnten eine Umsetzung autonomen Fahrens dort wesentlich erleichtern und ein Anpassungsbedürfnis autonomer Fahrzeuge an den Bedarf nach informeller Kommunikation weniger dringlich erscheinen lassen (als beispielsweise eine innerörtliche Verkehrsumgebung).

Auch ist anzunehmen, dass die Herausforderung, die in der Kommunikation liegt, nur im gemischten Verkehr auftritt, während sie insbesondere zwischen autonomen Maschinen technisch gut lösbar erscheint (über kooperative Systeme). Für den gemischten Verkehr ist zudem zu untersuchen, welche Bedeutung dem vorwegnehmenden Handeln zukommt, das sich in Bewegung ausdrückt, und wie es für eine künftige Kommunikation im Straßenverkehr genutzt werden kann. Insbesondere ist von Bedeutung, welche Situationen möglicherweise hierdurch eindeutig gelöst werden könnten. Hierbei ist aber zugleich die Gefahr zu berücksichtigen, wonach ein maschinelles Fahrsystem – durch eine stark die Fehlerkompensationsfähigkeiten anderer Verkehrsteilnehmer berücksichtigende Auslegung (s. Abschn. 25.5.4) – möglicherweise die Gefahr birgt, Einbußen für den Verkehrsfluss zu bedeuten, wenn diese durch andere Verkehrsteilnehmer zum eigenen Vorteil ausgenutzt werden.

Abschließend ist hinsichtlich der Kommunikation im Straßenverkehr festzuhalten, dass auch hier ein Katalog der technisch umsetzbaren Kommunikationsstrategien für autonome Fahrzeuge im Sinne eines Leistungskataloges ratsam erscheint, sobald dies technisch absehbar wird. Diese Zusammenstellung von Leistungsmerkmalen autonomer Fahrzeuge im

Hinblick auf die Kommunikation wird insbesondere im gemischten Verkehr langfristig erforderlich sein und könnte die Diskussion um mögliche Kommunikationskonzepte wesentlich voranbringen.

25.5.6 Regelübertretung

Über § 24 Straßenverkehrsgesetz als Blankettnorm in Verbindung mit den Ordnungswidrigkeitstatbeständen aus der Straßenverkehrsordnung (§ 49), Fahrzeugzulassungsverordnung (§ 48), Straßenverkehrszulassungsordnung (§ 69a) und Fahrerlaubnisverordnung (§ 75) werden Verstöße gegen Verbote, Gebote und Anordnungen an Verkehrsteilnehmer und Fahrzeughalter im Straßenverkehr im Wesentlichen geahndet [14]. Als Straftat gelten darüber hinaus Delikte im Zusammenhang mit dem Straßenverkehr aus dem 28. Abschnitt des Strafgesetzbuches (StGB) zu gemeingefährlichen Straftaten (im vorliegenden Zusammenhang sind insbesondere Eingriffe von außen in den Straßenverkehr gemäß § 315b StGB und Gefährdungen im Straßenverkehr gemäß § 315c StGB von einiger Bedeutung). Es liegt auf der Hand, dass ein maschinelles Steuerungsverhalten autonomer Fahrzeuge die Anwendung dieser Vorschriften ausschließt: Es wird bei Ordnungswidrigkeiten und Strafvorschriften stets an ein menschliches Handeln angeknüpft, an dem es vorliegend mangelt.

Die bestehenden Vorschriften, die strafrechtlich und als Ordnungswidrigkeit sanktioniert sind, haben gleichwohl eine Indizwirkung dahingehend, welches Verhalten im Straßenverkehr nicht nur die öffentliche Ordnung, sondern, insoweit hier von besonderem Interesse, gerade auch die öffentliche Sicherheit besonders infrage stellen kann. Die Verkehrsregeln sind dabei gleichwohl „... elastisch (verkehrsgerecht) und ohne Kleinlichkeit zu handhaben und auszulegen ...“, dies gilt auch, soweit es sich um Spezialregelungen handelt, die gegebenenfalls behindern oder gefährden können [14]. Darüber hinaus wird durch den in § 16 des Gesetzes über Ordnungswidrigkeiten geregelten Tatbestand des rechtfertigenden Notstandes ein gesetzlicher Rechtfertigungsgrund normiert, der bei gegenwärtigen, nicht anders abwendbaren Gefahrenlagen für Leben, Leib, Eigentum oder anderen Rechtsgütern erlaubt, auch Verkehrsregeln zuwider zu handeln, um die drohende Gefahr abzuwenden. Allerdings ist ein wesentliches Überwiegen der Gefahren erforderlich und die Angemessenheit der Gefahrenabwehr zu berücksichtigen. Wenngleich die entsprechenden Fälle restriktiv gehandhabt werden müssen, schon um Schutzbehauptungen zu vermeiden, handelt es sich hierbei letztlich um ein normatives Instrument, um eine interessengerechte Abwägung verschiedener grundrechtlich geschützter Rechtsgüter im Einzelfall widerspruchsfrei – und damit verfassungskonform – zu ermöglichen. Die Regelübertretung selbst unterliegt demselben Maßstab, sodass sie ihre äußerste Grenze für den Straßenverkehr letztlich in der „Gefahrschwelle“ für andere Verkehrsteilnehmer findet (vgl. [21] zur Frage der Berücksichtigung von Verkehrssicherheit im Rahmen der Abwägung im Tatbestand des rechtfertigenden Notstands gemäß § 16 Gesetz über Ordnungswidrigkeiten).

Wird vor diesem Hintergrund die Einführung autonomen Fahrens berücksichtigt, ist anzunehmen, dass die Interessenlage sich nicht verändert – jedenfalls für den Mischverkehr von autonomen und fahrergesteuerten Fahrzeugen, der hier zugrunde gelegt wird (s. Kap. 2). Eine Änderung könnte dann eintreten, wenn – aufgrund einer sehr weitgehenden maschinellen Beherrschung des mit der Regelübertretung einhergehenden maschinellen Steuerungsrisikos – die beschriebene Abwägung ergibt, dass eine Risikoerhöhung durch die Regelübertretung nicht eintritt. Damit wäre dann aber zugleich die Sinnhaftigkeit der betroffenen Regel als solche infrage gestellt: Die „Übertretung“ der Regel würde sich dann im Zusammenhang mit dem Mischverkehr nicht nachteilig auswirken.

Denkbar ist allerdings auch, dass autonomes Fahren dazu führt, dass Verkehrsregeln wesentlich detaillierter erforderlich wären und wesentlich weniger flexibel gehandhabt werden könnten (was wiederum die Frage gesellschaftlicher Akzeptanz aufwerfen würde). Für eine solche Einschränkung der bestehenden Situation wäre wiederum zunächst erforderlich, die technische Steuerungsleistung autonomer Fahrzeuge in einem Leistungskatalog näher zu beschreiben, sobald sie technisch absehbar wird. Dies würde erlauben, die Konsequenzen auch im Fall von Regelübertretungen wesentlich grundlegender zu erörtern, als dies nach gegenwärtigem Stand noch möglich ist.

25.6 Spezielle Rechtsfragen autonomen Fahrens

Hinsichtlich der ordnungsrechtlichen, produkt- und straßenverkehrshaftungsrechtlichen Bewertung vollautomatisierten, fahrerlosen Fahrens kann auf die bereits einleitend gemachten Ausführungen verwiesen werden (s. Abschn. 25.4.2 sowie die Einleitung zu Abschn. 25.5). Zusammenfassend lässt sich hierzu vor allem feststellen, dass insbesondere die ordnungsrechtlichen und straßenverkehrshaftungsrechtlichen Vorschriften (hier vor allem das Straßenverkehrsgesetz, die Straßenverkehrsordnung, Fahrerlaubnisverordnung, Straßenverkehrszulassungsordnung) zum Zeitpunkt ihrer Entstehung nur berücksichtigen konnten, was als Stand der Technik im Straßenverkehr bekannt war und als Regelungsgegenstand einbezogen wurde: Es wird durchgängig im öffentlichen Straßenverkehr von einem Fahrer ausgegangen, der die Fahrzeugsteuerung selbst vornimmt. Dabei ist auch hinsichtlich aller heute marktverfügbaren Systeme zu beobachten, dass sie gerade keine eigenständige Entscheidungsqualität (s. Abschn. 25.4.1) besitzen, sondern voraussetzen, dass der Fahrer mindestens „als Überwacher“ aktiv ist.

25.6.1 Ordnungsrechtliche Bewertung fahrerloser Fahrzeuge

Wird die ordnungsrechtliche Bewertung vollautomatisierten Fahrens [10] deshalb nochmals erweitert auf gänzlich unbemannte Fahrzeuge und Insassen, die nicht in der Lage sind, das Fahrzeug selbst zu führen, ist letztlich festzustellen, dass sich an der bereits bestehen-

den Unvereinbarkeit mit heutigem Ordnungsrecht, das diese technologische Veränderung bislang noch nicht berücksichtigt, zunächst einmal nichts ändert.

Gleichwohl ist darauf hinzuweisen, dass sich fahrerlose oder vollständig autonome Fahrzeuge (s. Use-Cases: „Autonomes Valet-Parken“ und „Vehicle-on-Demand“, Kap. 2) in den sich ergebenden Anforderungen an den rechtlichen Rahmen deutlich von solchen unterscheiden, die einen „Verfügbarkeitsfahrer“ voraussetzen: Mit der fortbestehenden Möglichkeit einer Fahrzeugführung durch den Fahrer sind für bestimmte Fahrtabschnitte oder im Fall des Übernahmewunsches durch den Fahrer dieselben Anforderungen grundlegender Art (Fahreignung und Fahrbefähigung, vgl. hierzu [18]) zu erfüllen, die bereits heute an einen Fahrer gestellt werden – im Fall des „Vollautomaten mit Verfügbarkeitsfahrer“ jedenfalls dann, wenn der Fahrer von der Möglichkeit, als Fahrer selbst zu steuern (also eigenständige Fahrqualität auszuüben), Gebrauch zu machen intendiert. Insoweit bedarf es keines grundlegend anderen, sondern eines um notwendige Vorschriften für autonome Fahrzeuge und damit eigenständige maschinelle Entscheidungsqualität ergänzten Rechtsrahmens. Mit Blick auf diese eigenständige maschinelle Entscheidungsqualität kommt man deshalb für alle Use-Cases in rechtlicher Hinsicht zu demselben Ergebnis. Der Wandel liegt vor allem in der Ermöglichung des eigenständigen maschinellen Wirkens und seiner Ausgestaltung. Die Ausgestaltung maschineller Fahrzeugsteuerung in ordnungsrechtlicher Hinsicht ist heute unregelt, obwohl eine Regelung – zumindest in sinngemäßer Anwendung mindestens der verhaltensrechtlichen Vorschriften der Straßenverkehrsordnung als technische Wirkvorschriften – angezeigt erscheint.

Sofern sich ein Regelungsbedürfnis autonomen Fahrens daher nicht bereits aus dem neuartigen maschinellen Automatisierungsrisiko selbst ergibt (s. Abschn. 25.5.1), erscheint zumindest im Hinblick auf den Einsatz entsprechender Funktionen im gemischten Verkehr hinsichtlich der Fehlerkompensationsfähigkeiten (s. Abschn. 25.5.4) und des Kommunikationsverhaltens (s. Abschn. 25.5.5) autonomer Fahrzeuge eine ordnungsrechtliche Regelung aber angezeigt. Bei der ordnungsrechtlichen Regelung solchen Interaktionsverhaltens wird zudem sehr genau zu berücksichtigen sein, wie weit die Rolle des Fahrers im Einzelfall überhaupt reicht: Berücksichtigt man die sich ergebenden technischen Möglichkeiten für eine im Einzelfall auch allein maschinell geprägte Mobilität (wie in den Use-Cases „Vollautomat mit Verfügbarkeitsfahrer“ oder „Vehicle-on-Demand“ beschrieben), erscheinen die bislang grundlegenden Anforderungen an Fahreignung und Fahrkompetenz bereits verzichtbar. Durch die vielfältigen Möglichkeiten könnte es deshalb letztlich zu einer bislang nicht gekannten Vielfalt ordnungsrechtlicher Vorgaben für die Teilnahme am Straßenverkehr mit (autonomen) Fahrzeugen kommen, die sich im Wesentlichen danach unterscheiden könnte, wie weit maschinelle Steuerungsqualität reicht und in welchem Umfang sie genutzt werden soll.

25.6.2 Bewertung autonomen Fahrens nach dem Haftungsrecht im Straßenverkehr

Hinsichtlich der mit dem autonomen Fahren einhergehenden Veränderung zu einem eigenständigen maschinellen Wirken bei der Fahrzeugsteuerung ist auch für die Bewertung des Haftungsrechtes im Straßenverkehr grundlegend festzustellen, dass die bestehenden Vorschriften diese Veränderung nicht berücksichtigen konnten.

25.6.2.1 Halterhaftung

Gleichwohl besteht in diesem Bereich eine grundlegende Haftungsvorschrift für Kraftfahrzeuge (§ 7 Straßenverkehrsgesetz), wonach der Halter des Fahrzeuges verschuldensunabhängig für den Fahrzeugbetrieb zum Ersatz aller kausal hierauf zurückzuführenden Schäden, die nicht Vermögensschäden sind, verpflichtet wird (einziger verbleibender Haftungsausschlussgrund ist die höhere Gewalt, § 7 Abs. 2 Straßenverkehrsgesetz). Diese Beschränkung auf den Fahrzeugbetrieb als haftungsauslösendes gesetzliches Tatbestandsmerkmal unterscheidet deshalb bereits heute nicht danach, ob es sich um einen Schaden handelt, der durch fahrerisches Steuerungsverhalten oder durch technisches Versagen verursacht wird. Da auch maschinelle Steuerungsentscheidungen, die kausal einen Schaden verursachen, sich widerspruchsfrei als technisches Versagen einordnen lassen, treten in dieser Hinsicht keine grundlegenden Widersprüche auf.

Fahrzeughalter ist, wer das Fahrzeug für eigene Rechnung gebraucht, also insbesondere die Nutzungen zieht und die Kosten bestreitet und somit auch berechtigt ist, über die Benutzung des Fahrzeuges als Gefahrenquelle zu entscheiden [14]. Geht man davon aus, dass auch fahrerlosen Fahrzeugen ein Halter zuzuordnen ist, was widerspruchsfrei nach geltendem Recht möglich wäre, würde in dieser Hinsicht auch bei solchen Fahrzeugen keine Unvereinbarkeit mit geltendem Recht auftreten. Autonomes Fahren würde dennoch den Gegenstand der Halterverantwortung verändern – allerdings ist die Halterverantwortung für autonomes Fahren nach dem heutigen Wortlaut der Vorschrift bereits mit umfasst: Die bislang durch den Fahrer erfolgende Fahrzeugsteuerung wird durch eine maschinelle Fahrzeugsteuerung ersetzt (soweit der Anwendungsbereich der jeweiligen autonomen Steuerung reicht). Für die Halterverantwortung ergeben sich daher nicht neue Pflichten, sondern eine völlig andere, neue Steuerungsqualität, die zivilrechtliche Haftung auslöst.

25.6.2.2 Fahrerhaftung und Unfalldatenaufzeichnung

Andere für die zivilrechtliche Haftung relevante Vorschriften des Straßenverkehrsgesetzes legen hingegen eindeutig die Steuerung eines Fahrers zugrunde, so beispielsweise § 18 Abs. 1 Straßenverkehrsgesetz, wonach in den Fällen der Halterhaftung zugleich eine Haftung des Führers des Kraftfahrzeuges vermutet wird (vgl. Satz 2). Damit liegt aber auch § 18 Straßenverkehrsgesetz letztlich nur wieder die bislang uneingeschränkt korrekte Annahme zugrunde, wonach stets ein Fahrer für das Steuerungsverhalten des Fahrzeuges zuständig ist. Letztlich unterscheidet sich deshalb die haftungsrechtliche Bewertung von fahrerlosen Fahrzeugen inhaltlich nicht von vollautomatisierten [10] Fahrzeugen. Entspre-

chend verhält es sich auch mit den bislang für deliktisches Verhalten von Fahrern anwendbaren Vorschriften des Bürgerlichen Gesetzbuches (beispielsweise § 823 Abs. 1 BGB oder § 823 Abs. 2 BGB in Verbindung mit verletzten Vorschriften der StVO), die gleichermaßen bei eigenständiger maschineller Fahrzeugsteuerung diese nicht mehr erfassen können (da sie an ein menschliches Handeln anknüpfen, das bei autonomen Fahrzeugen nicht gegeben ist).

Bei den vorliegend betrachteten autonomen Fahrzeugen, die zum Teil nicht einmal die Anwesenheit oder gelegentliche Steuerung durch einen Fahrer bedingen, ist infrage zu stellen, inwieweit für den Regelfall noch von der Fähigkeit der Fahrzeuginsassen auszugehen ist, einen Unfallhergang beschreiben zu können. Damit wird deutlich, dass bei der Frage des inneren Ausgleichs von Unfallschäden, die unter Beteiligung von zwei oder mehreren autonomen Fahrzeugen auftreten, die Schadensaufteilung nach geltendem Recht und damit § 17 Straßenverkehrsgesetz vor dem Problem steht, dass das vorwiegend zur Anwendung kommende „Maß der Verursachung“ [14] nicht mehr – wie heute aber üblich – mindestens auf eine Vernehmung der Fahrer (zumeist zugleich zivilrechtliche Prozesspartei, gegebenenfalls aber auch Zeuge) gestützt werden kann: Dem liegt vor allem die Rollenveränderung zugrunde, wonach der Fahrer „zum einfachen Passagier“ (s. Kap. 2) wird und deshalb zum Unfallhergang eher ausnahmsweise und nur aufgrund zufälliger Beobachtung Angaben machen können. Insoweit tritt eine Veränderung ein, die bereits für das Haftungsrecht im Straßenverkehr erforderlich erscheinen lässt, dass technische Vorkehrungen (wie eine Unfalldatenaufzeichnung während automatisierter Steuerung) als Grundlage für eine entsprechende Schadensaufteilung getroffen werden, sofern man haftungsrechtlich an diesem Aufteilungsprinzip nach Verursachungsanteilen auch für das autonome Fahren festhalten möchte (was durchaus möglich erscheint).

25.6.3 Bewertung nach dem Produkthaftungsrecht

Der Bereich der Produkthaftung für die automatisierte Steuerung autonomer Fahrzeuge wurde bereits in Abschn. 25.5.1 behandelt. Demnach kommt der Frage nach der im Einzelfall relevanten Ursache für einen Unfallschaden im Sinne naturwissenschaftlicher Kausalität entscheidende Bedeutung zu.

25.6.3.1 Produkthaftungsrechtliche Bedeutung eines Unfalldatenschreibers für das autonome Fahren

Darüber hinaus ergibt sich aber für die Fälle autonomen Fahrens, die einen „Verfügbarkeitsfahrer“ voraussetzen (s. Use-Cases „Autobahnautomat mit Verfügbarkeitsfahrer – Autobahnpiilot“ und „Vollautomat mit Verfügbarkeitsfahrer“, Kap. 2), noch ein weiterer Aspekt, der wiederum im Zusammenhang mit der Frage eines Unfalldatenschreibers steht: Sowohl im Hinblick auf das Produkthaftungsrecht (als auch ordnungsrechtlich hinsichtlich bußgeldbewehrter Verstöße gegen das Ordnungsrecht) liegt es nahe anzunehmen, dass als Schutzbehauptung durch einen aktiven Verfügbarkeitsfahrer vorgebracht werden könnte,

nicht selbst, sondern mithilfe des autonomen Steuerungssystems das Fahrzeug geführt zu haben. Will man entsprechende Schutzbehauptungen ausschließen, wird man sowohl zur produkthaftungsrechtlichen Absicherung des Herstellerinteresses als auch zur Erbringung des Nachweises im Rahmen des Ordnungswidrigkeitenrechtes kaum umhin kommen, eine Aufzeichnung von Daten bei der Fahrzeugsteuerung – mindestens während autonomer Steuerungsdauer – in Erwägung zu ziehen. Die Möglichkeit hierzu erscheint unter dem Aspekt des Datenschutzes zunächst nicht ausgeschlossen, sofern die Daten im Fahrzeug verbleiben, das Transparenzgebot gewahrt wird und die Datenverarbeitung nur im erforderlichen Umfang erfolgt, Daten mithin beispielsweise nur im Fall eines Unfallschadens dauerhaft gespeichert würden. Darüber hinaus ist eine Einschränkung der Datenaufzeichnung auf die Zeitdauer maschineller Steuerung in Erwägung zu ziehen, was dem Gebot der Datensparsamkeit (§ 3a Bundesdatenschutzgesetz), das sich im Übrigen gleichermaßen aus dem Verhältnismäßigkeitsprinzip jeder Datenverarbeitung ergeben wird, genügen sollte. Hierdurch würde auch die Aufzeichnung von Verhaltensdaten zur Fahrzeugsteuerung durch den Fahrer weitgehend vermieden. Besonderer Aufmerksamkeit bedürfte allerdings auch der Übergang zwischen den von Fahrern gesteuerten und maschinell gesteuerten Fahrabschnitten. In diesem Übergangsbereich könnte eine Datenaufzeichnung von besonderer Bedeutung sein, allerdings würde es sich zugleich eindeutig um Daten handeln, die auf den Fahrer bezogen sind. Insoweit wäre in einem ersten Schritt zu klären, welcher Aufzeichnungsumfang einer vom Fahrer gesteuerten Fahrt zur Absicherung gegen nachträgliche Schutzbehauptungen erforderlich wäre.

25.6.3.2 Der Stand von Wissenschaft und Technik beim autonomen Fahren

Produkthaftungsrechtlich erscheint für den Laien der Haftungsausschluss für Fehler im Zusammenhang mit maschineller Fahrzeugsteuerung von Interesse, die nach dem Stand von Wissenschaft und Technik zum Zeitpunkt des In-Verkehr-Bringens nicht erkannt werden können. In diesem Zusammenhang des Produkthaftungsrechtes ist zunächst erneut auf die insoweit bereits in Abschn. 25.5.1 diskutierte Frage hinzuweisen, wonach im Bereich des Straßenverkehrs möglich erscheint, dass Risiken, die sich im Unfallgeschehen verwirklichen, auch auf das heutige Verkehrssystem als relevante Ursache zurückzuführen sein könnten (und nicht in allen Fällen auf das Steuerungsverhalten – von Fahrern oder Maschinen gleichermaßen). Diese Frage ist grundlegend und bedarf vorrangig der Beantwortung, um nicht auf das Vorliegen von (vermeintlichen) Produktfehlern als relevanter Ursache rückzuschließen.

Soweit der Haftungsausschlussgrund nach dem Stand von Wissenschaft und Technik aber betroffen ist, muss berücksichtigt werden, dass dieser Ausschlussstatbestand in der Praxis von ausgesprochen geringer Bedeutung ist: Ob eine Gefahr nach dem Stand von Wissenschaft und Technik nämlich tatsächlich erkennbar war, ist in zwei Schritten zu prüfen: Zunächst ist zu bestimmen, ob der Fehler für irgendeinen Wissenschaftler oder Techniker auf der Welt erkennbar war. Wenn er es war, ist die Berufung auf den Ausschlussstatbestand noch nicht ausgeschlossen, weil es dann noch auf die objektive Zugänglichkeit dieser Erkennbarkeit für den Hersteller ankommt. Ausdrücklich zu berücksichtigen sind

dabei aber auch abweichende Meinungen einzelner Wissenschaftler, sofern diese Arbeiten den Mindestanforderungen wissenschaftlichen Arbeitens genügen [22].

Insoweit ist auch für autonome Fahrzeuge entscheidend, ob die Erkennbarkeit eines Fehlers zum Zeitpunkt des In-Verkehr-Bringens tatsächlich ausgeschlossen werden konnte (zudem müsste dies im Nachhinein, wenn es zu einem Unfallschaden gekommen ist, im zivilrechtlichen Verfahren aufgrund der dort geltenden Darlegungs- und Beweislast noch nachgewiesen werden). Nur in diesem seltenen Fall würde der Hersteller über diesen Haftungsausschlussgrund des Produkthaftungsgesetzes (und mangels Verschulden auch nach § 823 Abs. 1 BGB) an Rechtssicherheit gewinnen. In der Praxis wird dieser Fall nahezu bedeutungslos sein.

Ein Bewusstsein dafür, dass Produktfehler auch nach dem Stand von Wissenschaft und Technik bei Beachtung aller notwendigen Sorgfalt möglicherweise nicht gänzlich auszuschließen sind, mithin eine „Restfehlertoleranz“ – wie sie die Norm ISO 26262 zugrunde legt – besteht, ist darum als eine technische Beschreibung des Entwicklungsprozesses aufzufassen, die im Produkthaftungsrecht keine Entsprechung findet.

25.6.4 Mögliche Abweichungen der rechtlichen Bewertung im internationalen Kontext

Zunächst ist darauf hinzuweisen, dass das vorliegende Kapitel von vornherein nur die Situation nach deutschem Recht in Betracht zieht und Aussagen trifft, die sich an dem in Deutschland heute geltenden Recht orientieren. Von einer Anwendung auf andere Länder kann nur eingeschränkt ausgegangen werden. Eine Übertragbarkeit der Schlussfolgerungen wird abgesehen von Zufälligkeiten insbesondere dann möglich sein, wenn es zu einer Vereinheitlichung des Rechts aufgrund internationaler Verträge (also im Rahmen des Völkerrechts) oder durch Verordnungen und Richtlinien im Rahmen der Rechtssetzung der EU gekommen ist.

Demzufolge ist darauf zu verweisen, dass hinsichtlich der dargestellten grundrechtlichen Situation ein weitgehend übereinstimmender Grundrechtsstandard – soweit vorliegend im Zusammenhang mit den deutschen Grundrechten auf Leben und körperliche Unversehrtheit von Bedeutung – beispielsweise auch durch die Charta der Grundrechte der Europäischen Union anerkannt wird. Sie weist Bezüge zur Europäischen Menschenrechtskonvention auf und mit Ausnahme des Vereinigten Königreiches und Polens wurde durch Verweis im Lissabonner Vertrag die Europäische Grundrechtscharta für die Länder der Europäischen Union für bindend erklärt. Die Rechte auf Leben und körperliche Unversehrtheit werden darin anerkannt – im Einzelnen gemäß Art. 2 Abs. 1 und Art. 3 Abs. 1 Charta der Grundrechte der Europäischen Union (vgl. [23]). Diese Betrachtung ließe sich darüber hinaus beliebig auf die Verfassungen anderer Staaten ausweiten; festzuhalten ist insoweit jedoch, dass die Grundrechtsdogmatik sich in vielen Einzelbereichen deutlich unterscheiden kann. Eine solche Untersuchung obliegt deshalb den Spezialisten der jeweiligen Rechtsmaterie.

Das gilt gleichermaßen für das Ordnungsrecht im Straßenverkehr wie auch für das zur Anwendung kommende Haftungsrecht, das für autonomes Fahren von Bedeutung ist. Hierbei ist aber, wie in Abschn. 25.6.1 und Abschn. 25.6.2 beschrieben, bereits die Rechtslage nach deutschem Recht in sehr weiten Teilen nur sehr eingeschränkt auf das autonome Fahren übertragbar. Es erscheint durchaus möglich, dass eine vergleichbare Situation auch nach anderen Rechtsordnungen besteht. Hierfür spricht auch, dass internationale Straßenverkehrsübereinkommen wie das Wiener Übereinkommen über den Straßenverkehr von 1968 oder das Genfer Übereinkommen über den Straßenverkehr von 1949 ein mit der deutschen Straßenverkehrsordnung durchaus vergleichbares Fahrerbild sowie ständige Fahrzeugsteuerung durch einen Fahrer zugrunde legen.

Im Sinne einer besseren Vergleichbarkeit ist insoweit auf das Produkthaftungsrecht hinzuweisen, das durch die Richtlinie 85/374/EWG des Rates vom 25. Juli 1985 innerhalb der Europäischen Union bereits vereinheitlicht worden ist. Auch hier bestehen zwar neben rechtsdogmatisch zu machenden Einschränkungen noch Unsicherheiten darin, dass die Richtlinie bei ihrer Umsetzung nur hinsichtlich des Zieles verbindlich ist (ein Grundsatz, der schon nach der vormaligen Rechtslage bestand und sich heute in Art. 288 Abs. 3 des Vertrages über die Arbeitsweise der Europäischen Union findet). Dennoch liegt immerhin eine inhaltlich vergleichbare Rechtsmaterie für die innerstaatliche Rechtsanwendung vor, die nicht an ein Verschulden anknüpft (sogenannte Gefährdungshaftung).

Zusammenfassend ist deshalb festzuhalten, dass in diesen Bereichen noch erhebliche Unterschiede bestehen, die sich auf die Entwicklung autonomen Fahrens auswirken könnten. Das ist aber aufgrund der nationalen Prägung des Rechts nicht im Einzelnen absehbar und – soweit gegenwärtig ersichtlich – weiterhin untersuchungsbedürftig.

25.6.5 Sonderfrage: Aufsichtspflicht über Insassen autonomer Fahrzeuge

Der Nutzen autonomen Fahrens liegt u. a. darin, dass Aufmerksamkeitsressourcen des Menschen nicht mehr für die Ausführung der Fahraufgabe benötigt werden. Dies kann potenziell dazu führen, die Anwesenheit des „Fahrers“ und damit der aufsichtspflichtigen Person im Fahrzeug insgesamt infrage zu stellen. So würde ein erheblicher Mehrnutzen autonomen Fahrens sich daraus ergeben, dass auch Mobilitätswünsche von Kindern – ohne eines Fahrers zu bedürfen – erfüllt werden könnten. Es ist deshalb keineswegs auszuschließen, dass hieraus Gefahren resultieren, wenn es sich – wie voraussichtlich häufig – beim Fahrer um die aufsichtspflichtige Person handelt, die dann nicht mehr anwesend ist.

Allerdings erscheint von den vorliegenden Stellvertreterapplikationen nur der Fall des „Vehicle-on-Demand“ überhaupt geeignet, eine solche Transportaufgabe ohne die Begleitung Aufsichtspflichtiger überhaupt durchzuführen: Selbst die Stellvertreterapplikation des „Vollautomaten mit Verfügbarkeitsfahrer“ setzt die Anwesenheit eines Fahrers voraus, um nicht freigegebene Verkehrsbereiche oder vom autonomen Fahren ausgenommene Streckenabschnitte befahren zu können (s. Kap. 2). Da die Stellvertreterapplikation des

„Vehicle-on-Demand“ schon keinen Fahrerplatz aufweist (sondern einen völlig frei gestalteten Innenraum), erscheinen Gefahren und Auswirkungen aus der Nutzung durch aufsichtsbedürftige Personen sich zunächst auf den Fahrzeuginnenraum zu beschränken und sich nicht auf den Straßenverkehr auszuwirken. Dann würde sich die Frage der Abwesenheit aufsichtspflichtiger Personen allerdings nicht mit Relevanz im Bereich des Straßenverkehrs stellen. Es erscheint allerdings ebenso denkbar, dass entsprechende autonome Fahrzeuge noch einen Fahrerplatz aufweisen. Dann wäre aber auch potenziell ein erheblicher negativer Einfluss auf die Fahrzeugsteuerung möglich, indem eine Übersteuerung der autonomen Fahrfunktion über die Bedienelemente erfolgt.

Es bleibt festzustellen, dass die rechtliche Frage der Aufsichtspflicht nicht von der Einführung autonomen Fahrens abhängig ist. Vielmehr können schon heute eigenständige Schadensersatzpflichten durch eine Aufsichtspflichtverletzung herbeigeführt werden (vgl. § 832 Bürgerliches Gesetzbuch (BGB)). So besteht eine gesetzliche Aufsichtspflicht der Eltern im Rahmen elterlicher Sorge, §§ 1626 ff. BGB. Damit wäre abhängig von Alter, Eigenart, Charakter, Kenntnissen und Fähigkeiten beispielsweise eines Kindes zu bestimmen, welche Intensität der Aufsicht angesichts einer Voraussesbarkeit schädigenden Verhaltens im Einzelfall geboten ist [24]. Wird eine sich ergebende Pflicht verletzt und kommt es hierdurch zu einem Schaden, kann sich ein eigenständiger Schadensersatzanspruch (neben einem gegebenenfalls gegen das Kind selbst bestehenden Anspruch) auch gegenüber den Eltern des Kindes ergeben. Insoweit könnte aus den entsprechenden Möglichkeiten autonomer Fahrzeuge resultieren, dass der korrekten Erfüllung von Aufsichtspflichten in diesem Zusammenhang eine neue, bislang unbekannte Bedeutung zukommt. Ein rechtlicher Änderungsbedarf ist aber nicht ersichtlich.

25.7 Fazit

Aus der mit dem vorliegendem Kapitel vorgenommenen Betrachtung autonomen Fahrens aus einer rechtlichen Perspektive tritt – neben den bereits in den jeweiligen Unterabschnitten aufgeworfenen Fragen – vor allem ein grundlegender Aspekt in Erscheinung, der im Zusammenhang mit dem Wandel von einer menschlichen zu einer maschinellen Fahrzeugsteuerung möglicherweise deutlicher als bisher erkennbar wird: Auch wenn heute davon ausgegangen wird, dass grundsätzlich jeder Unfall von Kraftfahrzeugen im Straßenverkehr auf ein Versagen bei der Steuerung zurückzuführen ist, muss im Sinne einer naturwissenschaftlichen Aufarbeitung danach gefragt werden, inwieweit das heutige Verkehrssystem angesichts der dort herrschenden Rahmenbedingungen nicht eine eigenständige, relevante Ursache für einen Teil des heutigen Unfallgeschehens darstellt. Die Beantwortung dieser Frage ist dabei nicht Selbstzweck, sondern kann helfen zu erkennen, ob und gegebenenfalls welche Veränderungen bei der Fahrzeugsteuerung unter bestimmten Umgebungsbedingungen geeignet sind, Unfälle zu vermeiden. Für die Gestaltung eines autonomen Fahrzeuges als ein sicheres Produkt ist dies seitens eines Herstellers zudem entscheidend hinsichtlich der Ausgestaltung autonomer maschineller Steuerungsfunktionen.

Weiterhin scheint für die weitere Bearbeitung – wie auch für die Rechtssicherheit sowohl der (Fahrzeug-)Betriebsverantwortlichen als auch der Hersteller autonomer Fahrzeuge – die Beschreibung maschineller Steuerungsqualität im Sinne einer Leistungsdefinition ein wichtiger Meilenstein zu sein. Hierauf könnte eine Bewertung aufbauen, die ermittelt, genau in welchen Bereichen beispielsweise bezüglich der Kommunikationsfähigkeiten autonomer Fahrzeuge oder Fehlerkompensationsfähigkeiten noch Entwicklungsbedarf besteht. Umgekehrt wird eine Betrachtung ermöglicht, wie der entsprechende rechtliche Rahmen ausgestaltet sein muss, um zu einem funktionierenden „Verkehrssystem Straße“ unter Beteiligung autonomer Fahrzeuge zu kommen.

Literatur

1. Homann, K.: Wirtschaft und gesellschaftliche Akzeptanz: Fahrerassistenzsysteme auf dem Prüfstand. In Maurer, M.; Stiller, C. (Hrsg.), Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung. Berlin (2005)
2. Projekt: Realisierung einer automatisierten U-Bahn in Nürnberg (RUBIN) – Automatisierung der U-Bahn-Linien U2 und U3 in Nürnberg, ausgeführt durch die Siemens Mobility (ehemals: Siemens TS). Konzeptionelle Darstellung inzwischen nur noch unter: <https://de.wikipedia.org/wiki/RUBIN> sowie Hinweis auf das Pilotprojekt der Siemens Mobility unter: http://www.siemens.de/staedte/referenzprojekte/seiten/rubin_nuernberg.aspx
3. Murswiek, Dietrich: Grundgesetz Kommentar (zu Art. 2 GG). In Sachs, M. (Hrsg.), 6. Auflage, München (2011)
4. Heldmann, Horst: 15 Jahre Strafbewehrung der Gurtanlagepflicht in Zeitschrift für Verkehrssicherheit (ZVS) 45 (1999), S. 146–159
5. Statistisches Bundesamt, Verkehrsunfälle 2013 – Fachserie 8, Reihe 7. Wiesbaden (2014)
6. Herber, Franz-Rudolf: Die öffentliche Straße als öffentliche Sache – öffentliche Sachherrschaft und private Sachherrschaft. In Kodol, K. (Hrsg.): Straßenverkehrsrecht. 7. Auflage, München (2010)
7. Stahlhut, Ulrich: Der schlichte Gemeingebrauch. In Kodol, K. (Hrsg.): Straßenverkehrsrecht. 7. Auflage, München (2010)
8. Daimler AG: Mercedes Benz, Betriebsanleitung Interaktiv S-Klasse. Menüpunkte: „Vertiefen“/ „Fahrssysteme“/ „DISTRONIC PLUS“. Online abgerufen: http://www4.mercedes-benz.com/manual-cars/ba/cars/221/de/manual_base.shtml (am 04.08.2014)
9. Maurer, Markus: Entwurf und Test von Fahrerassistenzsystemen. In Winner, H.; Hakuli, S. und Wolf, G. (Hrsg.), Handbuch Fahrerassistenzsysteme. 2. Auflage, Wiesbaden (2012)
10. Gasser, Tom M.; Arzt, Clemens; Ayoubi, Mihir; Bartels, Arne; Bürkle, Lutz; Eier, Jana; Flemisch, Frank; Häcker, Dirk; Hesse, Tobias; Huber, Werner; Lotz, Christine; Maurer, Markus; Ruth-Schumacher, Simone; Schwarz, Jürgen; Vogt, Wolfgang: Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung. Gemeinsamer Schlussbericht der BAST-Projektgruppe „Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung“ Dokumententeil 1. Wirtschaftsverlag NW, Bergisch Gladbach, 2012 (Heft F 83)
11. Bundesverfassungsgerichtsentscheidung Band 47, Seiten 46 – 85 (Sexualkundeunterricht), Ausführungen zum sogenannten „Wesentlichkeitsgrundsatz“: Seite 79. Beschluss des 1. Senates v. 21. Dez. 1977
12. Bundesverfassungsgerichtsentscheidung Band 83, Seiten 130–155 (Josefine Mutzenbacher), Ausführungen zum sogenannten „Wesentlichkeitsgrundsatz“: Seite 142. Beschluss des 1. Senates v. 27. Nov. 1990

13. Bundesverfassungsgerichtsentscheidung Band 49, Seiten 89–147 (Kalkar I), Ausführungen zum „Parlamentsvorbehalt“: Seiten 124ff. Beschluss des 2. Senates v. 08. August 1978
14. König, Peter: Kommentierung zur Straßenverkehrsordnung und Straßenverkehrsgesetz. In Hentschel, P.; König, P.; Dauer, P.: Straßenverkehrsrecht (Kommentar). 42. Auflage, München (2013)
15. Spiegel, Richard: Die neuen Erkenntnisse über die Reaktionszeit des Kraftfahrers und die Rechtsprechung. Veröffentlichung der auf dem 20. Verkehrsgerichtstag am 28. und 29. Januar 1982 gehaltenen Referate, Arbeitskreis I. Hamburg (1982)
16. Seiniger, Patrick; Bartels Oliver; Pastor, Claus; Wisch, Marcus: An Open Simulation Approach to Identify Chances and Limitations for Vulnerable Road User (VRU) Active Safety. Traffic Injury and Prevention, Heft 14, S. 2–12 (2013)
17. Albrecht, Frank: Fahrerassistenzsysteme zur Geschwindigkeitsbeeinflussung. Deutsches Auto-recht (DAR), Heft 4, S. 186–198 (2005)
18. Bahr, Michael; Sturzbecher, Dietmar: Bewertungsgrundlagen zur Beurteilung der Fahrbe-fähigung bei der praktischen Fahrerlaubnisprüfung. Beitrag im Rahmen des 6. Darmstädter Kolloquiums: Maßstäbe des sicheren Fahrens (2013)
19. Merten, Klaus: Informelle Zeichengebung im Straßenverkehr. Bericht der Bundesanstalt für Straßenwesen Nr. 53. Köln (1981)
20. Merten, Klaus: Kommunikationsprozesse im Straßenverkehr. Unfall- und Sicherheitsforschung im Straßenverkehr, Heft 14, S. 115–126. Bonn (1977)
21. Beschluss des Oberlandesgerichtes Hamm v. 30.10.1995 (Aktenzeichen: 2 Ss OWi 1097/95) in Verkehrsrechtssammlung Band 91, Nr. 50, Seite 125 ff. (1996)
22. Wagner, Gerhard: Bearbeiter der Kommentierung des Produkthaftungsgesetzes und § 823 Abs. 1 BGB in Münchener Kommentar zum BGB, Band 5, Schuldrecht Besonderer Teil III, §§ 705–853 BGB, Partnerschaftsgesellschaftsgesetz, Produkthaftungsgesetz. 5. Auflage, München (2009)
23. Charta der Grundrechte der Europäischen Union. Amtsblatt der Europäischen Union C 83/ 389 vom 30.03.2010 (2010/C 83/02) (2010). Im Internet verfügbar unter: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:C:2010:083:0389:0403:DE:PDF> (Abruf am 22.08.2014)
24. Sprau, Hartwig: Kommentierung zu §§ 631–853 des Bürgerlichen Gesetzbuches. In Palandt, Bürgerliches Gesetzbuch, Kommentar, 73. Auflage, München (2014)

Stephen S. Wu

Content

26.1 Introduction	576
26.2 Why do product liability suits occur?	577
26.3 More recent high-profile product liability litigation	579
26.3.1 “Sudden acceleration” litigation	580
26.3.2 General Motors ignition switch issues and recall	581
26.4 Claims and defenses in product liability cases	582
26.4.1 Strict product liability claims	582
26.4.2 Negligence claims	583
26.4.3 Breach of warranty claims	584
26.4.4 Claims under consumer protection laws	585
26.4.5 Types of defects at issue in autonomous vehicle litigation	585
26.4.6 Defenses in product liability cases	587
26.5 Managing the risk of autonomous vehicle product liability	588
26.6 Conclusions	590
References	590

S.S. Wu (✉)
USA
ssw@svlg.com

26.1 Introduction

Autonomous vehicles (AVs) hold the promise of saving tens of thousands of lives each year in the U.S., and many more worldwide, reducing traffic, saving energy, and providing mobility to those who cannot drive conventional cars. Nonetheless, AVs will inevitably have some accidents. On balance, AVs are likely to prevent many more accidents than they cause, but there will be at least some accidents involving AVs that would not have occurred with conventional vehicles.

Because of accidents involving AVs, some of which may be catastrophic, product liability litigation¹ is inevitable, especially in cases where conventional vehicles would not have crashed. The threat of massive product liability litigation involving AVs is widely perceived as one of the chief obstacles to AV development and sales, if not the number one threat [3].² Some believe that product liability suits may be an existential threat to autonomous driving [33].³ Crippling suits could force manufacturers to exit the market and may deter some manufacturers from entering the market because of a belief that the sales are not worth the risk. If these dire predictions come to pass, the U.S. and other parts of the world experiencing a flood of lawsuits may lose the use of a technology that would save many times more lives than it would endanger. If, however, the industry finds effective ways to manage the risk of product liability, it can bring to market a lifesaving technology while maintaining practices to minimize accidents and resulting liability, as well as the profitability needed to offer AVs in the market over time.

The purpose of this chapter is to identify product liability risks in the U.S. to manufacturers of AVs, the source of those risks, and how manufacturers can manage those risks. A focus on U.S. product liability is important from a worldwide manufacturer's perspective given the size of the U.S. market and the perception that the U.S. is a litigious country. Product liability is perceived as a greater threat in the U.S. than in any other country of the world. Section 26.2 discusses the circumstances giving rise to U.S. product liability litigation and the phenomenon of some U.S. cases resulting in huge awards to plaintiffs seeking compensation. It explains why these huge awards occur. Section 26.3 analyzes the human and financial impacts of more recent high profile product liability cases. Section 26.4 discusses U.S. product liability law, focusing on the types of claims and defenses arising in product liability cases. Section 26.5 covers design practices and procedures that manufacturers can use to reduce the risk of product liability, the use of

1 This chapter focuses mainly on product liability litigation, although there are also requirements to compel vehicle manufacturers to recall their vehicles to fix defects. The management of liability and recall risks overlap and the risk management principles discussed in this chapter apply to both.

2 "Some of the largest obstacles to autonomous consumer vehicles are the legalities [3]." Reports from Lloyd's of London and the University of Texas listed product liability as among the top obstacles for AVs [21] [30].

3 "[T]he worst outcome would be that said liability isn't sorted out so that we never do get the mass manufacturing and adoption of driverless cars." [33]

insurance as a means of shifting and managing product liability risk, and other risk management techniques.

26.2 Why do product liability suits occur?

First and foremost, manufacturers face product liability suits, because their products are involved in accidents. From the early days in the development of Anglo-American tort⁴ law, the road accident played a prominent role. A key British case in the development of U.S. tort law, *Winterbottom v. Wright*,⁵ involved a mail coach driver who was thrown from his horse-drawn mail carriage after it broke down, allegedly due to the defendant contractor's failure to maintain the carriage in a safe condition [32].⁶

Starting in the 20th century, the car accident caused significant changes in U.S. product liability law. "Products liability, like America, grew up with the automobile. Prior to the entry of motorcars onto the nation's highways, 'there simply were not large numbers of product-related lawsuits.' Once America embraced the automobile, it inevitably embraced automotive products suits as well." [13] Two of the most significant products liability cases in American history arose from auto accidents. In *MacPherson v. Buick Motor Co.*, the famous American jurist Benjamin Cardozo writing for the New York Court of Appeals upheld a verdict for a car owner ejected from his Buick car after a defective wooden wheel on the car collapsed [22].⁷ In *Henningsen v. Bloomfield Motors, Inc.* [17],⁸ the New Jersey Supreme Court affirmed a jury verdict against Chrysler and a dealer after the wife of the purchaser had an accident. She testified that she felt something crack in the car, the steering wheel spun sharply, the car veered off the road, and the car struck a highway sign and brick wall.

The threadbare descriptions of the car accidents in these appellate courts' decisions, however, do not reflect the reality of the trial setting in which lawyers for the injured plaintiffs will describe what might be a catastrophic car accident in unvarnished and sometimes horrific terms. Consider a description of the famous Ford Pinto accident written in Mother

4 "Tort" means "wrong," and "tort law" provides a mechanism for a plaintiff to seek redress in a civil (*i.e.*, non-criminal) case.

5 It was common in the 19th century for American courts to cite contemporary British cases as precedents.

6 In *Winterbottom*, the court denied relief to the injured coachman because of a lack of direct contractual relationship, called "privity," between the plaintiff coachman and the defendant contractor. The coachman was not a party to the contract in which the defendant contractor promised to maintain the coach in good working order [32].

7 The plaintiff had bought the car from a retailer, but could still sue the manufacturer despite the lack of privity with the manufacturer [22]. The car was apparently going 8 miles per hour at the time of the accident [13].

8 The court rejected privity, a warranty disclaimer, and limits of liability as defenses to the warranty claim of the wife driver of the car and her husband, the owner [17].

Jones magazine. Although the description below comes from a writer,⁹ it is similar in tone and impact to what a plaintiff's lawyer might say about his or her client in an opening statement. Here is how the writer describes the accident:

[A] woman, whom for legal reasons we will call Sandra Gillespie, pulled onto a Minneapolis highway in her new Ford Pinto. Riding with her was a young boy, whom we'll call Robbie Carlton. As she entered a merge lane, Sandra Gillespie's car stalled. Another car rear-ended hers at an impact speed of 28 miles per hour. The Pinto's gas tank ruptured. Vapors from it mixed quickly with the air in the passenger compartment. A spark ignited the mixture and the car exploded in a ball of fire. Sandra died in agony a few hours later in an emergency hospital. Her passenger, 13-year-old Robbie Carlton, is still alive; he has just come home from another futile operation aimed at grafting a new ear and nose from skin on the few unscarred portions of his badly burned body. [11]

In the courtroom, the young boy, so badly disfigured by the accident, would likely be sitting next to his attorney during the entire trial. The jury would be seated facing him, and watching him. The unspoken testimony of his catastrophic injuries would likely have at least an unconscious effect on the jurors watching him. Despite instructions from the judge not to permit sympathy, bias, or prejudice to sway their verdict, a car manufacturer defending this case would have a difficult time at trial. In the Ford Pinto case, the 13-year-old boy, whose real name was Richard Grimshaw, received a jury award in the amount of over \$2.5 million in compensatory damages and an award of punitive damages to punish and deter Ford in the amount of \$125 million [15]. Part of the motivation for the large verdict was evidence during the trial of Ford's apparently cold-hearted decision not to use fairly inexpensive parts in its cars that would have prevented the accident. Although the punitive damages award was later reduced in this case to \$3.5 million [15], the Ford Pinto case shows the kind of award that is possible in an automobile product liability case following a catastrophic accident.

At some future time when an AV manufacturer faces a product liability trial, we can expect to see accident victims seated in a courtroom with similar gruesome disfigurements and stories of out-of-control cars and tragic, frightful accidents. The defendant manufacturer's engineering and business practices will come under scrutiny. And a jury will likely decide whether or not the manufacturer should be held responsible for the accidents.

During an AV's design phase, its manufacturer's design team will have an opportunity to discuss and make engineering and business decisions about the design of its AVs. Team members will talk about safety efforts the manufacturer is willing to undertake. In these discussions, team members can think more clearly and assess risk more effectively by imagining themselves in a courtroom setting, defending their practices in litigation arising from a catastrophic accident.

⁹ The writer is using pseudonyms for the names of the crash victims, evidently before the names of the victims became public.

Why are jurors willing to render these large verdicts against manufacturers? The short answer is juror anger. “Angry jurors mean high damages.” [24] More specifically, juries render large verdicts when they become angry at defendants’ conduct. When juries become angry, the only way that they see they can redress the defendants’ wrongs is to render very large verdicts against them in an effort to send a message that their conduct is unacceptable.

In the Ford Pinto case, the jury heard evidence that Ford had known about the problems with its fuel system. Ford had found the problem of rear-end crashes splitting open the Pinto’s gas tank. In addition, Ford knew that a part costing \$11 could have prevented the accident. Nonetheless, Ford made a cost/benefit analysis comparing the overall cost of adding the safety part to the vehicle against the value of the lives lost from accidents involving the vulnerability. Ford assigned a value to each human life likely lost. And Ford decided that the overall cost of the part exceeded the overall value of the human lives that would be saved and determined that it therefore should not add the part to the Pinto’s design.

Ford’s cost/benefit calculation seemed odious to the jury because it placed a dollar value on human life. In addition, the jury knew that the extra part would only cost \$11. By not adding the part to the Pinto’s design, the jury evidently concluded that Ford placed its profits ahead of human life. Ford’s apparent callousness led to the jury anger [15].

In another famous product liability case, a Texas lawyer obtained a \$253.5 million verdict against pharmaceutical company Merck for Carol Ernst, the widow of Robert Ernst. Mr. Ernst died after having taken Merck’s painkiller Vioxx for eight months [5]. The jury saw internal Merck documents showing that the company was aware of the heart attack risk to users before it started marketing the drug. The documents gave the jury the impression that the company cared more about profits than public safety. As a result, the jury tried, via the huge award, to send a message that it is wrong to hide information about a drug’s danger [14]. Although an appellate court later overturned the jury’s verdict, again the case underscores the risk of huge product liability verdicts [23].

26.3 More recent high-profile product liability litigation

As noted in the previous section, appellate courts provided some relief to Ford and overturned the verdict in the Vioxx case. Nonetheless, manufacturers should look to two more recent sets of cases in order to analyze the potential human and financial impact of product liability issues. Section 26.3.1 covers the so-called “sudden acceleration” phenomenon involving Toyota cars. Section 26.3.2 describes the fallout from the General Motors ignition switch defects. These two cases show how manufacturers may need to pay huge sums to resolve product liability legal proceedings, which are in addition to the human toll of deaths and injuries.

26.3.1 “Sudden acceleration” litigation

Several years ago, news stories emerged concerning a phenomenon in which Toyota drivers reported that their cars accelerated without warning and were difficult to stop, resulting in accidents. One typical news report stated, “Nancy Bernstein feels lucky to be alive after her Toyota Prius kept accelerating, no matter how hard she hit the brakes. ‘The car’s going about 70 miles an hour, and I’m beginning to get scared because it’s not slowing down,’ Bernstein described.” [26]. Lawsuits followed these accidents, and federal cases were transferred to the U.S. District Court for the Central District of California for coordinated or consolidated pretrial proceedings [27].

Some reports contend that the 89 people may have died from accidents involving the sudden acceleration of Toyota vehicles [10]. Governmental investigations, however, showed no evidence that design or implementation flaws in Toyotas caused unintended acceleration [25]. Accordingly, there was some controversy about whether Toyota or drivers were at fault in these accidents.

Later in the litigation, however, a report by expert witness Michael Barr following additional research opined that a software malfunction occurred in one of the cars and that the malfunction resulted in unintended acceleration [4]. Barr identified numerous alleged problems with the software, which according to Barr, Toyota’s own engineers had trouble understanding and characterized as “spaghetti like” [4]. Barr testified about his findings in an Oklahoma state court case and, apparently based in part on these findings, the jury in the case awarded compensatory damages of \$1.5 million to the driver and \$1.5 million to the family of a passenger who died in the crash [35]. The parties in the case, *Bookout v. Toyota Motor Corp.* [7], settled the case right before a second phase of the trial to consider punitive damages against Toyota [18].

Despite the uncertainty about what really caused these accidents, Toyota started to settle the various legal actions against the company. The Oklahoma case may have been a motivating factor [28].¹⁰ Toyota’s settlement payments so far include:

- \$1.6 billion to settle financial loss claims in the multidistrict litigation [28].
- \$1.2 billion to settle potential criminal charges against Toyota [29].
- \$25.5 million to settle shareholder claims arising the failure to report safety issues [29].
- \$65 million in fines for violations of federal vehicle safety laws [29].

These settlement payouts are in addition to the numerous product liability lawsuits that remain pending, the settlement of which presumably will cost a huge sum. If product liability settlement amounts exceed \$1 billion, then the total settlements may exceed \$4 billion. The cost of legal fees and other internal expenses related to investigation and remedial measures will add even more to the final cost for Toyota.

¹⁰ “Legal analysts said that the verdict most likely spurred Toyota to pursue a broad settlement of its remaining cases.” [28]

26.3.2 General Motors ignition switch issues and recall

Another high-profile product liability issue arose from the recently uncovered problem with ignition switches in certain General Motors cars. In the late 1990s, GM started using new switches for small cars to make them work more smoothly. “But as it turns out, new switches in models such as the Chevrolet Cobalt and Saturn Ion can unexpectedly slip from ‘run’ to ‘accessory,’ causing engines to stall. That shuts off the power steering, making cars harder to control, and disables air bags in crashes [20]. The problem supposedly caused over 50 accidents. “GM says the problem has caused at least 13 deaths, but some members of Congress put the death toll near 100.” [20]

Apparently, GM engineers were aware of the problem before the accidents, but decided not to replace the switches. An internal email uncovered in Congressional hearings discussed the fact that a more robust design would add 90 cents to the price of the switch, and would only save 10-15 cents in reduced warranty claims [16]. “The part costs less than \$10 wholesale. The fix takes less than an hour. A mechanic removes a few screws and connectors, takes off a plastic shroud, pops in the new switch, and the customer is back on the road.” [12] “[T]o many people familiar with the automaker,” the reason GM did not recall the cars sooner “is a corporate culture reluctant to pass along bad news. When GM was struggling to cut costs and buff its image, a recall of its popular small cars would have been a terrible setback.” [12] “It’s pretty clear that somebody somewhere was being penny-wise and pound-foolish,” said Marina Whitman, a professor at the University of Michigan and a former economist at GM.” [12]

GM’s decision not to recall the cars sooner is proving to be a costly one. Congress, safety regulators, the U.S. attorney in New York City, the SEC, Transport Canada, and 45 state attorneys general are conducting probes of GM. GM is undertaking a costly recall of the cars. Also, GM created a compensation fund for families of crash victims, which it expects will cost the company \$400 million to \$600 million [19].

In addition to the compensation fund, GM said that it will spend \$1.2 billion to repair the cars and trucks recalled during the second quarter, on top of the \$1.3 billion it identified for repair costs in the first three months of the year. In addition, the company set aside an additional \$874 million in the quarter for future recalls. [19]

The total expense for GM will be huge: “All told, GM’s recalls have cost the automaker nearly \$4 billion this year.” [19] Presumably, GM will continue to pay more in future years as well. Moreover, GM will have to pay even more for legal fees and other internal expenses related to investigation and remedial measures.

26.4 Claims and defenses in product liability cases

Having covered the phenomenon of product liability litigation, the human toll of accidents, and the large financial risks involved, this section covers what plaintiffs must prove in order to prevail in a suit based on an allegedly defective product, as well as what defendants must prove in order to assert certain defenses. Typical claims for plaintiffs seeking damages for bodily injury or property damage from an accident are “strict product liability,” “negligence,” and “breach of warranty.”¹¹ Most of the law governing product liability in the U.S. is state law, as opposed to federal law, and laws diverge from state to state.

26.4.1 Strict product liability claims

The easiest type of claim for a plaintiff to prove is a so-called “strict product liability” claim. A plaintiff can include in the suit almost every business in the chain of distribution from raw materials or component part manufacturers to manufacturers of the finished product, distributors, and retailers [13]. Strict liability refers to liability for defective products without fault on the part of the manufacturer and regardless of whether or not there is a contractual relationship between the plaintiff and defendant. Laws vary significantly from state to state, and some states do not even recognize strict liability as a viable claim. Nonetheless, most states’ statutory and common law strict liability laws are based on the formulation of strict liability under Section 402A of the Second Restatement of Torts [2].¹² As stated in the Restatement, in order to win a strict liability claim, the plaintiff must prove at trial:

- The defendant sold the product in question,
- The defendant is in the business of selling this kind of product,
- The product was defective and unreasonably dangerous at the time it left the defendant’s hands,
- The product is expected to and does reach the user or consumer without substantial change in the condition in which it is sold, and
- The defect was the proximate cause of the plaintiff’s injuries [2].

The key issue for AV strict liability design defect claims will be whether the vehicle was “defective.” A plaintiff may assert that the product was defective in its design, the product was defective in the way it was manufactured, and/or that the defendant failed to provide

11 Another theory of recovery for plaintiffs is fraud, also known as “deceit” or “misrepresentation,” and is based on false statements made by the seller about a product. Misrepresentations may be intentional, negligent (careless), or innocent. This type of claim, however, is the least used theory of recovery in the product liability context [13].

12 “More than three quarters of American jurisdictions incorporate all or part of this section in their own distinct brand of strict liability.” [13] Restatements of law summarize an area of law in the U.S., but do not themselves have the force of law.

adequate warnings or instructions to the users of the product. Of greatest concern for AV litigation are design defect and failure to warn claims.

A plaintiff asserting a design defect would show the existence of a “defect” under the applicable state law test. Courts in the U.S. apply one of the following tests:

- A test based on what an ordinary consumer would expect from a product, typically used where the potential for injury is clear to consumers from the nature of the product.
- The risk-utility balancing test, where the plaintiff contends that the risks from a design outweigh the benefits to the consumer or public from a design.
- The product manufacturer test, which asks whether a reasonably prudent manufacturer or seller, aware of the product’s dangerous condition, would not have put the product on the market if it had been aware of the product’s condition.
- A combination test, which may shift the burden of proof to the manufacturer to show a lack of defect in certain situations.
- The ultimate issue approach, in which the jury has the discretion to determine whether a design is defective [31].

Frequently, a plaintiff asserting a design defect will use expert testimony to explain why the defendant’s design is defective and will attempt to prove that an alternative design could have prevented the accident.

In addition to relying on design defects, a plaintiff may also assert a strict liability claim based on a “failure to warn” theory. Under this theory, the plaintiff could contend that an AV was defective because the defendant failed to provide adequate warnings or instructions about the vehicle. The plaintiff would need to prove that the warnings did not adequately reduce risks associated with the product or that the instructions were inadequate to tell the user how to use the product.

26.4.2 Negligence claims

As an alternative claim, product liability plaintiffs often include a negligence claim in their complaints. The concept of “negligence” refers to careless conduct that falls below the standard of conduct to which a hypothetical “reasonable man” would adhere. As with strict liability, a plaintiff can assert a negligence claim based on the design of the product, the way in which the product was manufactured, or the failure to give adequate warnings or instructions. Negligence is a harder claim for a plaintiff than strict liability, because the plaintiff must show some degree of fault on the part of the defendant.

In order to prevail in a negligence claim, the plaintiff must prove:

- The defendant owed a duty of care to provide a reasonably safe product in terms of design or to warn of dangerous defects – meeting a standard of conduct to protect others against unreasonable risk,

- The defendant breached its duty of care by failing to conform its conduct to the standard of conduct required, and
- The defendant's conduct proximately caused the plaintiff's injury [31].

26.4.3 Breach of warranty claims

In most states in the U.S., a plaintiff may also include a breach of warranty claim in a product liability complaint. Warranties are affirmations or promises concerning a product or its performance, features, or characteristics, such as those concerning the safety of a product. The basis of a breach of warranty claim is that the seller's product does not perform as promised, or does not have the features or characteristics promised. Design defects, manufacturing defects, or failures to warn may all provide the basis for a warranty claim. As with strict liability, the question is whether or not the product adheres to the promises made, regardless of whether the seller is at fault for the failure to conform to the promise. Nonetheless, warranty claims are subject to defenses with various degrees of effectiveness, including the historical defense of "privity" (plaintiff's lack of contractual relationship with the defendant), the requirement that the plaintiff provide the seller notice of the breach, and the ability for sellers to disclaim warranties [31]. In most U.S. jurisdictions, purchasers of a product or their family members can sue companies in the chain of distribution under a warranty theory despite the lack of privity [31].

In order to assert a breach of warranty claim, a plaintiff must typically prove:

- The defendant made a warranty,
- The product did not comply with the warranty at the time of the sale,
- The plaintiff's injury was proximately caused by the defective nature of the product, and
- As a result, the plaintiff suffered damage [31].

A warranty claim will typically allege one of three kinds of warranties. "Express warranties" are those actually stated by the seller, such as in a sales contract, warranty program documentation, advertisements, or sales collateral. They may be written or oral. In addition to the express warranties, the law will sometimes recognize two kinds of "implied warranties" regarding the sale of consumer products that arise by operation of law, as opposed to anything the seller actually said.

One kind of implied warranty is the "implied warranty of merchantability." This implied warranty requires the seller to make sure the product is fit for the ordinary purposes of such product. For instance, a consumer would expect that the head of a hammer would not fly off the first time it is used after purchase. This kind of implied warranty is the one most likely to be asserted against a seller of an AV in future cases. The second typical implied warranty is the "warranty of fitness for a particular purpose." Where the seller knows the particular purpose for which the consumer will use the product, and the buyer is relying on

the skill and judgment of the seller to select and furnish suitable products, the law will recognize an implied warranty that the product will be fit for that purpose. For instance, if a truck buyer tells a dealer's sales representative that the buyer seeks a pickup that will be able to tow a trailer through mountainous off-road terrain, then the dealer is deemed to have warranted that the truck recommended by the sales representative can, in fact, tow the trailer off-road in the mountains.

26.4.4 Claims under consumer protection laws

Plaintiffs sometimes assert product liability claims under various consumer protection laws. State laws vary, and some states do not permit these laws to be used for personal injuries [1]. They are commonly used when plaintiffs seek redress for alleged economic or financial losses, such as the diminution in the value of their products due to the alleged defect. Examples include California's Unfair Competition Law (UCL) [8], False Advertising Law (FAL) [8], and Consumer Legal Remedies Act (CLRA) [9], as well as equivalent laws in other states. Claims under these statutes typically require plaintiffs to prove:

- A violation of the statute occurred
- That causes
- Injury to a consumer.

For instance, the UCL prohibits unlawful, unfair, or fraudulent business acts or practices. The FAL bars untrue or misleading advertising practices. The CLRA prohibits a list of unfair business practices, such as misrepresenting the characteristics and qualities of a product.

26.4.5 Types of defects at issue in autonomous vehicle litigation

We do not yet have examples of cases filed against AV manufacturers to say what kinds of alleged defects will likely result in litigation. Nonetheless, the history of automotive litigation, discussions with those in the industry, and judgments about what is likely to come suggest that there will be many sources of potential defects that may give rise to product liability litigation. AVs will share some of these sources of defects with conventional vehicles, but some of them will be unique to AVs. The lists of potential defects in this section are not meant to be exclusive, and there are many possible sources of defects in conventional and autonomous vehicles.

Some possible design defects¹³ that AVs will have in common with conventional vehicles include:

¹³ Another issue for manufacturers of finished products concerns their supply chains. Counterfeit or defective components may introduce manufacturing defects into AVs.

- Mechanical or physical defects in various systems of the vehicles or their safety equipment, such as the use of materials that are not strong or thick enough,¹⁴ or an excessively high center of gravity subjecting the vehicle to rollovers.
- Defects in electrical components or systems other than sensors or control systems for autonomous driving, such as the use of wrong kind of components, problems in the performance of the components, or the lack of durability of the components.
- Software¹⁵ defects relating to systems other than sensors or control systems for autonomous driving, including information security vulnerabilities.

These defects will occur in both conventional and autonomous vehicles and thus existing law and litigation methods would apply to determine a manufacturer's liability.

Nonetheless, AVs may experience defects that conventional vehicles do not. Again, they may be mechanical, electronic, or software.

- Mechanical or physical defects in the control systems for autonomous mode or the sensors used by the autonomous systems. A simple example would be weak mountings for LIDAR sensors which, if they failed, might cause the AV to lose its sensor data suddenly and crash.
- Defects in electrical components for sensors or control systems for autonomous driving.
- Software defects in the sensors or control systems used for autonomous mode.

The most interesting and perhaps most concerning potential defects are those in the software used for autonomous driving. Some examples include:

- Designs that depend on inadequate data from sensors, including insufficient amount, inaccuracy, deficient precision, or inadequate speed of data input.
- Inaccurate pattern recognition, such as the AV failing to be able to recognize a pedestrian in the road or other upcoming obstacles or hazards.
- Designs that fail to perform safe ordinary maneuvers such as turns, lane-keeping, distance-keeping, and merging.
- Other problems with autonomous behavior, such as unpredictable changes in speed or direction.
- Deficient collision avoidance algorithms.
- Information security vulnerabilities.
- Defects arising from inadequate human-computer coordination. For instance, if an AV switches between autonomous and manual mode, the AV must alert the driver before switching to manual mode and transition to human control safely.

14 For example, the author was involved in one case in which the plaintiff alleged that the metal in a car's tie rod was not strong enough, the metal fatigue experienced by ordinary wear of the car weakened the tie rod, and an accident occurred because metal fatigue caused the tie rod to break.

15 The "software" involved may be in the form of code built into hardware or firmware.

Moreover, Chapter 4 discusses design decisions programmers must make when creating the logic for an AV to handle the situation of when a collision is imminent and unavoidable and there is a choice between striking and harming different persons. For instance, an AV may face the dilemma of striking a motorcycle rider wearing a helmet or one without a helmet, and a programmer might decide that it is better, if a collision is unavoidable, to strike one or the other. If the programmer makes such a decision and designs the software to implement that decision, this kind of design decision could be the subject of a product liability suit from the person struck by operation of the software.

26.4.6 Defenses in product liability cases

Defendants may assert a number of defenses against a product liability case. The most common types of defenses relate to the conduct of the plaintiff. In some cases, the defendant contends that the plaintiff's negligent conduct caused or contributed to an accident. The viability of a defense based on a plaintiff's own negligence depends on state law and the type of claim, but a defendant may also use it as evidence of a superseding cause of an accident. In addition, some accidents occur because a plaintiff misused or modified a product. In some cases, a plaintiff is said to have "assumed the risk" of an open, obvious hazard, such as the possibility of being struck by a golf ball on the links. Finally, a plaintiff may not be able to recover all damages if he or she failed in some way to mitigate the damages.

Many of these defenses may have limited application to persons driving AVs in autonomous mode. If the plaintiff was not in control of the vehicle at the time of the accident, the plaintiff could not have driven carelessly. Once AVs enter the mass market, a seller cannot realistically contend that the plaintiff assumed the risk of driving a vehicle using new and untested technology. Nonetheless, it is likely over time that some people will modify their AVs or try to abuse the sensors or control systems for fun. In these cases, if an accident occurs, the defendant may point to this conduct as a defense. Moreover, defenses based on a plaintiff's conduct could reduce or bar a plaintiff's recovery when the plaintiff was not a driver of the AV, such as a pedestrian carelessly (or intentionally) darting out in front of an AV faster than any human or machine could react.

The other key defense in AV litigation will likely be a "state of the art" defense to a design defect claim. The basis of this defense is that the manufacturer could not have produced a safer design at the time of sale because safer designs were not technologically feasible then. Such a defense is valid in some states while not in others [13].¹⁶

¹⁶ Another typical product liability-specific defense is the economic loss doctrine, which bars product liability tort claims where the claimed damages are financial and not for bodily injury or damage to property other than the product itself. Moreover, federal law may preempt some state law claims, because U.S. federal law trumps state laws inconsistent with it. Also, if a product is meant to be used by a "sophisticated user" or provided by a "sophisticated intermediary," the seller may have a defense under certain circumstances, although this defense is unlikely to apply to AVs. Finally, if a manufacturer creates a product pursuant to government specification, it may have a "government contractor defense."

26.5 Managing the risk of autonomous vehicle product liability

Having covered the nature of product liability, the potentially huge exposure for losses, juror anger that leads to huge jury verdicts, and the nature of product liability, I now turn to the issue of how manufacturers can manage the risk of product liability litigation.¹⁷ First and foremost, managing these risks requires a proactive approach. By planning today, manufacturers can be prepared for the inevitable suits later. First, planning can enable them to make safer products that are less likely to cause litigation-triggering accidents in the first place. Second, by planning ahead, manufacturers can increase their chances of winning the cases that accidents do trigger. A proactive approach to design safety with a comprehensive risk management program establishes upfront a manufacturer's commitment to safety. When the inevitable suit happens later, the manufacturer's counsel has a story to tell the jury as to why its products were safe and how the manufacturer cared about safety.

Second, manufacturers should consider the commitment they make to product safety using such a proactive approach. One commentator stated, "The most effective way for [counsel for] a corporate defendant to reduce anger toward his or her client is to show all the ways that the client went *beyond what was required by the law or industry practice.*" [24]. Meeting minimum standards is insufficient because of juror skepticism about the rigor of standards set or influenced by industry and because jurors expect corporate clients to know more about product safety than a "reasonable person" – the standard for judging the conduct of defendants under the law [24]. "A successful defense can also be supported by walking jurors through the relevant manufacturing or decision-making process, showing all of the testing, checking, and follow-up actions that were included. Jurors who have no familiarity with complex business processes are often impressed with all of the thought that went into the process and all of the precautions that were taken." [24] Even though accidents do occur, and in any trial setting an accident or problem did occur, a defendant's proactive approach would show the jury that the manufacturer tried hard to do the right thing [24]. Consequently, efforts to go above and beyond the minimum standards would diffuse juror anger and mitigate the manufacturer's risk.

Third, manufacturers should recognize that risk management is a process that begins with a careful risk analysis looking at the types, likelihood, and impact of issues in the design of AVs. Once a risk assessment is complete, they can review the results and analyze changes in design and engineering practices to address these issues, prioritize risks and risk mitigation measures, and implement the prioritized risk mitigation measures [34]. In connection with the risk management process, manufacturers can obtain guidance from a number of standards bearing on risk management and safety:

¹⁷ I speak here of product liability litigation, although the risk management techniques here also apply to preventing the need for costly product recalls.

- ISO 31000 “Risk management – Principles and guidelines” (regarding the risk management process).
- Software development guidelines from the Motor Industry Software Reliability Association.
- IEC 61508 Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems (safety standard for electronic systems and software).
- ISO 26262 family of “Functional Safety” standards implementing IEC 61508 for the functional safety of electronic systems and software for autos.

While adherence to the principles of international standards does not guarantee that an AV manufacturer will avoid liability, adherence to standards bolsters the credibility of a manufacturer’s risk management program. Moreover, the standards provide a framework by which manufacturers can build a set of controls for their risk management process. Consequently, an AV safety program built on international standards lays the foundation for a later defense of a manufacturer accused of building an unsafe AV.

Fourth, AV manufacturers should obtain insurance coverage to manage product liability risk. A robust insurance program will permit manufacturers to shift the risk of product liability to insurance carriers who will, under issued policies, defend and indemnify manufacturers for settlements and judgments paid to resolve third party claims. Currently, the insurance industry is just beginning to come to grips with the insurance implications of AVs [21]. We can expect to see the insurance industry provide third party coverage to manufacturers for accidents, and probably privacy and information security risks as well. While the industry has no historical data for an actuarial approach to underwriting AV risks, the industry will probably look by analogy to conventional vehicles and mobile devices for loss experiences [6]. AV manufacturers can find carriers willing to write bespoke policies tailor-made to their needs. Eventually other carriers will enter the market and offer more standardized policies, thereby reducing premium costs to manufacturers over the long run.

Fifth, manufacturers can work together on industry risk management initiatives, such as:

- Participation in standards efforts to promote safety and security within the industry and among component manufacturers;
- Collaborating with other manufacturers in trade groups and (subject to antitrust concerns) purchasing consortia; with the purchasing power of larger numbers of manufacturers, the industry may have greater leverage with component manufacturers to promote safe design and manufacturing processes; and
- Participation in information sharing groups that can collaborate to develop best practices to improve product safety.

Sixth, manufacturers can manage the risk of huge jury awards by certain pre-litigation strategies. For instance, they may want to engage jury consultants that assist the defense of product liability cases to identify risk factors for the manufacturer and the types of conduct that trigger juror anger. In addition, manufacturers may want to identify and cultivate a

group of defense experts they can use to educate jurors about various engineering, information technology, and safety considerations. Moreover, counsel for manufacturers may want to join specialty bars for defense counsel for purposes of sharing information, briefs, and other work product.

Finally, manufacturers can maximize their success in future product liability trials by focusing on effective records and information management (RIM). Effective RIM may win cases, while poor RIM may lose cases. Documents and records produced contemporaneously with the management of a safety program can corroborate the testimony of witnesses, provide a historical record documenting a manufacturer's safety efforts, and send the message that the manufacturer cares about safety.

26.6 Conclusions

One of the top, if not the top, challenge autonomous vehicle manufacturers face is the risk of product liability suits and recalls in the wake of accidents resulting in deaths and catastrophic injuries. Lawsuits in which manufacturers appear callous, placing profits over safety, face the risk of huge liabilities. Recent reports about "sudden acceleration" in Toyota cars and problems with General Motors' ignition switches show that these companies are paying multiple billions of dollars to resolve legal claims. Plaintiffs have a number of claims they can assert against AV manufacturers, although manufacturers may have defenses as well. Various kinds of defects may crop up with AVs, although problems with software, logic, autonomous behavior, and programmer decisions on AV behavior in crashes are top concerns. Nonetheless, manufacturers can manage product liability risk through careful planning, a strong commitment to safety, an effective risk management process beginning with a thorough risk analysis, adherence to international standards, obtaining robust insurance coverage, collaboration with other manufacturers, pre-litigation legal strategies, and effective records and information management practices. In sum, the threat of crippling product liability litigation in the United States poses a profound concern for manufacturers of autonomous vehicles, but starting proactive engineering design strategies for safety risk management and legal strategies to anticipate future litigation now can place manufacturers in the best position to maximize product safety and minimize product liability in upcoming decades.

References

1. ALEE, JOHN, et al., PRODUCT LIABILITY § 18.02 (2014)
2. American Law Institute, Restatement (Second) of Torts § 402A(1) (1965)
3. Autonomous Solutions Inc., 5 Key Takeaways from AUVSI's Driverless Car Summit 2012 (Jul. 12, 2012)
4. Barr, Michael, Rule 26(a)(2)(B) Report of Michael Barr April 12, 2013 in Estate of Ida St. John v. Toyota Motor Corporation, et al., 39, 54, 65 (Apr. 12, 2013)

5. Berenson, Alex, *Vioxx Verdict Raises Profile of Texas Lawyer*, N.Y. TIMES, Aug. 22, 2005, available at <http://www.nytimes.com/2005/08/22/business/22lawyer.html?pagewanted=all>
6. Beyer, David et al., *Risk Product Liability Trends, Triggers, and Insurance in Commercial Aerial Robots* 20 (Apr. 5, 2014) (describing nascent insurance coverage for drones), available at http://robots.law.miami.edu/2014/wp-content/uploads/2013/06/Beyer-Dulo-Townsley-and-Wu_Unmanned-Systems-Liability-and-Insurance-Trends_WE-ROBOT-2014-Conference.pdf
7. *Bookout v. Toyota Motor Corp.*, No. CJ-2008-7969 (Okl. Dist. Ct. Okl. Cty. dismissed Nov. 20, 2013)
8. Cal. Bus. & Prof. Code §§ 17200 et seq., 17500 et seq.
9. Cal. Civ. Code § 1750 et seq.
10. CBS News and Associated Press, Toyota “Unintended Acceleration” Has Killed 89, CBS NEWS (May 25, 2010), <http://www.cbsnews.com/news/toyota-unintended-acceleration-has-killed-89/>
11. Dowle, Mark, *Pinto Madness*, MOTHER JONES, Sept. 1977, available at <http://www.motherjones.com/print/15406>
12. Fletcher, Michael & Mufson, Steven, *Why did GM take so long to respond to deadly defect? Corporate culture may hold answer*, WASH. POST, Mar. 30, 2014, available at http://www.washingtonpost.com/business/economy/why-did-gm-take-...swer/2014/03/30/5c366f6c-b691-11e3-b84e-897d3d12b816_story.html
13. FRUMER, LOUIS R., ET AL, PRODUCTS LIABILITY §§ 1.02, 2.04, 2.05[1], 5.01, 8.04 (2014)
14. Girion, Lisa and Calvo, Dana, *Merck Loses Vioxx Case*, L.A. TIMES, Aug. 20, 2005, available at <http://articles.latimes.com/2005/aug/20/business/fi-vioxx20>
15. *Grimshaw v. Ford Motor Co.*, 119 Cal. App. 3d 757, 771–72, 813, 823–24 (1981)
16. Hendler, John, email to Lori Queen et al. (Sept. 28, 2005, 4:07 pm), <http://docs.house.gov/meetings/IF/IF02/20140618/102345/HHRG-113-IF02-20140618-SD036.pdf>
17. *Henningsen v. Bloomfield Motors, Inc.*, 32 N.J. 358, 161 A.2d 69 (1960)
18. Hirsch, Jerry, *After losing verdict, Toyota settles in sudden acceleration case*, L.A. TIMES, Oct. 25, 2013, available at <http://articles.latimes.com/2013/oct/25/autos/la-fi-hy-toyota-settles-sudden-acceleration-20131025>
19. Isidore, Chris, *GM to pay victims at least \$400 million*, CNN MONEY, Jul. 24, 2014, available at <http://money.cnn.com/2014/07/24/news/companies/gm-earnings-recall/>
20. Krisher, Tom, *GM’s ignition switch: what went wrong*, COLUMBUS DISPATCH, Jul. 8, 2014, available at <http://www.dispatch.com/content/stories/business/2014/07/08/gms-ignition-switch-what-went-wrong.html>
21. Lloyd’s, *Autonomous Vehicles Handing Over Control: Opportunities and Risks for Insurance* 8 (2014)
22. *MacPherson v. Buick Motor Co.*, 217 N.Y. 382, 111 N.E. 1050 (1916)
23. *Merck & Co., Inc. v. Ernst*, 296 S.W.3d 81 (Tex. Ct. App. 2009), cert. denied, 132 S. Ct. 1980 (2012)
24. Minick, Robert D. & Kagehiro, Dorothy K., *Understanding Juror Emotions: Anger Management in the Courtroom*, FOR THE DEFENSE, July 2004, at 2, 3 (emphasis added), available at http://www.krollontrack.com/publications/tg_forthedefense_robertminick-dorothyhagehiro070104.pdf
25. National Highway Traffic Safety Administration, *Technical Assessment of Toyota Electronic Throttle Control (ETC) Systems* 57–60, 62–64 (Feb. 2011); see NASA Engineering and Safety Center, *Technical Support to the National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) on the Reported Toyota Motor Corporation (TMC) Unintended Acceleration Investigation* 170–172 (Jan. 18, 2011)
26. Romero, Ric, *Sudden Acceleration Issue Spans Beyond Toyota*, 6ABC.COM (Jan. 4, 2010), <http://6abc.com/archive/7200572/>
27. *Toyota Motor Corp. Unintended Acceleration Marketing, Sales Practices, and Products Liability Litigation*, No. 8:10-ML-2151 JVS (FMO) (C.D. Cal. filed Apr. 12, 2010) (cases consolidated)

- by the Judicial Panel on Multidistrict Litigation in the U.S. District Court for the Central District of California)
28. Trop, Jaclyn, *Toyota Seeks a Settlement for Sudden Acceleration Cases*, N.Y. TIMES, Dec. 13, 2013, available at http://www.nytimes.com/2013/12/14/business/toyota-seeks-settlement-for-lawsuits.html?_r=0
 29. Undercoffler, David, *Toyota and Justice Department said to reach \$1.2 billion settlement in criminal case*, L.A. TIMES, Mar. 18, 2014, available at <http://www.latimes.com/business/autos/la-fi-hy-autos-toyota-justice-department-settlement-20140318-story.html>
 30. University of Texas, *Autonomous Vehicles in Texas* 5 (2014)
 31. VARGO, JOHN, PRODUCTS LIABILITY PRACTICE GUIDE §§ 6.02[1], 6.02[4], 6.03[1], 6.04 (2014)
 32. *Winterbottom v. Wright*, 152 Eng. Rep. 402 (1842)
 33. Worstall, Tim, *When Should Your Driverless Car From Google Be Allowed To Kill You?*, FORBES, available at <http://www.forbes.com/sites/timworstall/2014/06/18/when-should-your-driverless-car-from-google-be-allowed-to-kill-you> (Jun. 18, 2014)
 34. Wu, Stephen, *Risk Management in Commercializing Robots* 6–8 (Apr. 3, 2013), available at <http://conferences.law.stanford.edu/werobot/wp-content/uploads/sites/29/2013/04/Risk-Management-in-Commercializing-Robotics.pdf>
 35. Yoshida, Junko, *Toyota Case: Single Bit Flip That Killed*, EE TIMES, Oct. 25, 2013

Bryant Walker Smith

Content

27.1 Introduction	594
27.1.1 In Context	594
27.1.2 What Is Risk?	595
27.1.3 What is Regulation?	596
27.1.4 The Regulatory Challenge	597
27.2 Ensure Compensation	597
27.2.1 Expand Public Insurance	597
27.2.2 Facilitate Private Insurance	598
27.3 Force Information-Sharing	599
27.3.1 Privilege the Concrete	599
27.3.2 Delegate the Safety Case	600
27.4 Simplify the Problem	602
27.4.1 Limit the Duration of Risk	602
27.4.2 Exclude the Extreme	602
27.5 Raise the Playing Field	603
27.5.1 Reject the Status Quo	603
27.5.2 Embrace Enterprise Liability	606
27.6 Conclusion	607
References	608

B. W. Smith (✉)
University of South Carolina School of Law, USA
bryantws@civil.co.de

27.1 Introduction

27.1.1 In Context

Two complex and conflicting objectives shape altruistic regulation of human activity: maximizing net social good and mitigating incidental individual loss. Eminent domain provides a superficially simple example: To build a road that benefits ten thousand people, a government evicts – and compensates – the ten people whose homes are in the way. But in many cases, individual loss is not fully compensable, most strikingly when that loss involves death: Whatever her actual detriment, a person who dies cannot be “made whole.” And indeed, more than 30,000 people lose their lives on US roadways every year while more than 300 million obtain some direct or indirect benefit from motorized transport.

The promise that vehicle automation holds for highway safety raises difficult questions about regulation’s social and individual objectives. Analyzing either objective requires topical and temporal definition of a manageable system in which costs and benefits can be identified, valued, and compared. With respect to net social good, what is the statistical value of a human life? Is a reduction in organ donations a “cost” of safer highways? Could aggressive deployment of particular technologies cause a backlash that ultimately undermines safety? Similarly, with respect to individual loss, how should injury or death be valued? Should culpability affect compensation? Who is entitled to it? The particular answers to these questions may depend on the domain – law, economics, ethics, the social sciences – from which they are drawn.

Vehicle automation exposes tension between the social and individual objectives. Externalities frequently accompany innovation: Inventors impose costs that they need not or cannot bear and create benefits that they cannot capture. Compensation of incidental injury may be one such cost, and socially desirable innovations like automation might be subsidized by shielding them from it. Calibrating net social good and individual loss can also create moral hazard: Safety might be discounted by innovators who are legally or effectively exempt from rules and immunized from lawsuits or by consumers who are assured of compensation for injury.

This tension exists against two related background conditions. The first is a preference for the status quo – a tendency that is reflected in administrative law, in tort law, and internationally in the precautionary principle. Many vehicle fatalities appear only in local obituaries, but a single automated vehicle fatality would end up on national front pages. The second is a failure by imperfectly probabilistic humans to accurately perceive risk. Drivers who speed around blind corners but fear traveling over bridges demonstrate this tendency to underestimate some risks and overestimate others.

This complex regulatory context leads to two fundamental questions: How should risk be allocated in the face of significant uncertainty – and who should decide? The range of actors includes the legislative, executive, and judicial branches of national and subnational governments, companies, standards organizations, consumers, and the public at large. Regulation can be prospective or retrospective, but it cannot be nonexistent: Administrative

Table 27.1 Potential Regulatory Strategies

Ensure sufficient compensation for those who are injured	
Expand public insurance	Facilitate private insurance
Force information-sharing by the private sector to enhance regulation	
Privilege the concrete	Delegate the safety case
Simplify both the technical and the regulatory challenges in coordination	
Limit the duration of risk	Exclude the extreme
Raise the playing field for conventional actors along with automated systems	
Reject the status quo	Embrace enterprise liability

agencies that decline to establish safety requirements for automated vehicles merely leave this task to judges and juries after incidents have occurred.

The consequences of action or inaction are as stark as they are uncertain. Regulatory acts or omissions could cost lives in the near term by delaying or raising the price of automation technologies [28]. But they could also save lives in the longer term by protecting broad classes of innovation from the potential reputational damage that early tragedies or controversies could inflict. Charting the currents of abstract social gain and concrete human loss from vehicle automation requires appreciating the risks that regulation presents as well as those that it addresses.

This chapter first considers the nature of risk, the nature of regulation, and the challenge of regulating – in a broad sense – the increasing automation of motor vehicles. It then introduces four pairs of potential strategies to respond to this challenge, as summarized in Table 27.1 (above).

These strategies are not exhaustive. They may be unnecessary. And they may be insufficient. Some are obvious, some are unconventional, and some may well be both. Their purpose is to advance discussion of the proper role of the public sector – legislatures, administrative agencies, and courts – in addressing automation’s challenges and opportunities.

27.1.2 What Is Risk?

Risk can mean so many things that, without context, it means not much at all. Broadly, “[t]he risk of a particular harm is the product of the probability of that harm and the severity of that harm; the risk of an act or omission is the sum of the risks of the particular associated harms” [20]. This actual risk, however, is merely theoretical: No actor can comprehensively inventory all associated harms or accurately determine their probabilities and magnitudes.

In practice, actual risk is therefore simplified into assessed and perceived risk. Assessed risk reflects a methodical attempt to objectively describe all significant harms within a defined system; this system might contemplate a broad range of harms, as in the case of an environmental impact statement, or a more narrow range, as in the case of a functional

safety standard focused on physical injury to humans [20]. In contrast, perceived risk reflects an individual's subjective judgment about particular dangers; it may differ considerably from the assessed risk.

An internalized risk is one that is borne by the actor who creates it, regardless of whether that actor has correctly assessed or perceived that risk. Internalization is central to tort law's regulatory role: By forcing actors to bear more of the costs of their unreasonably dangerous behavior, tort law seeks to deter that behavior.

The financial risks imposed on these actors, however, are categorically different from the physical risks that these actors impose on others. In obligating these actors to pay damages to those they have injured, tort law also plays a compensatory role. Nonetheless, even if those who are injured succeed in recovering damages, they will still have been injured [20].

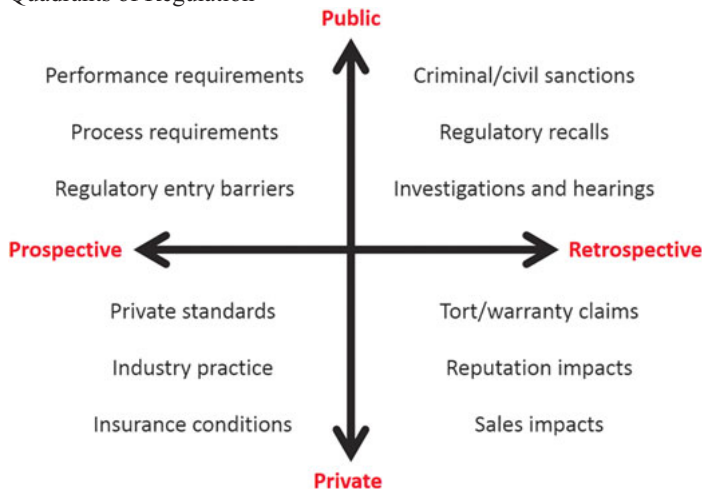
Accordingly, it is important to distinguish between reducing physical risk (a regulatory function) and shifting financial risk (a compensatory function). Some of the regulatory strategies introduced below may achieve one of these two objectives at the expense of the other.

27.1.3 What is Regulation?

Regulation checks and changes behavior. In its narrowest sense, the term refers only to rules enacted by an administrative agency. A more useful conception, however, encompasses a broad range of actions, including those illustrated in Figure 27.1 [24].

Regulation can be prospective (forward-looking) or retrospective (backward-looking). Prospective actions, shown on the left side, contemplate a generalized risk that has not manifested, as in the case of the federal performance requirements governing vehicle design. In

Figure 27.1 Quadrants of Regulation



contrast, retrospective actions, shown on the right side, respond to the realization of a risk, as in the case of a tort claim by a person injured in a crash. The possibility of retrospective regulation, particularly if it is foreseeable, can affect behavior even if the risk is never realized.

Regulation can also be pursued by a public actor or by a private actor. Public actions, shown on the top, include typical functions of the state: setting requirements and conducting investigations. In contrast, private actions, shown on the bottom, generally involve relationships among private parties: a consensus among market participants, a contract between an insurer and its insured, or the tort duties of a manufacturer to those who are injured by its products.

Although this chapter focuses on public actors, these private relationships remain an important tool of public policy. A statutory requirement that drivers obtain sufficient insurance, for example, delegates some regulatory power to the private-sector insurance companies that then decide, subject to additional public regulation, how much any particular driver should be charged.

27.1.4 The Regulatory Challenge

For public regulators, the utilitarian challenge is to indirectly maximize net social good while indirectly mitigating incidental individual loss. With respect to vehicle automation, this means defining an appropriate system in which societal costs and benefits can be analyzed [20], checking that the incentives and disincentives for developers of automated systems are consistent with that system, reconciling these with the incentives and disincentives for other actors, and ensuring that those who are harmed have appropriate access to some means of compensation.

This chapter outlines four pairs of potential regulatory strategies that could advance these goals. Its focus on risk management by public actors complements earlier risk management proposals for private actors [21]. These strategies involve ensuring compensation by expanding public insurance and facilitating private insurance, forcing information-sharing by privileging the concrete and delegating the safety case, simplifying the problem by limiting the duration of risk and excluding the extreme, and raising the playing field by rejecting the status quo and embracing enterprise liability.

27.2 Ensure Compensation

27.2.1 Expand Public Insurance

Insurance can help reduce the financial burden placed on injured individuals and, potentially, the compensatory pressure placed on tort law. Ensuring that those who are physically injured by automated vehicles are able to recover for their injuries makes the occurrence of those injuries, at least from a public policy perspective, more justifiable. If the only

avenue for that recovery, however, is litigation, product liability law may be forced to bend in ways that distort its regulatory function.

While an expansion of insurance has merit as a standalone initiative, it must be a condition of any reasonable proposal to subsidize vehicle automation by limiting tort remedies. Reducing a defendant's liability means reducing an injured individual's access to compensation. It also means depriving that individual of a sanctioned means of recourse: Suing a manufacturer, whatever its inefficiencies, is still preferable to sabotaging that company's products or undertaking other means of private retribution.

27.2.2 Facilitate Private Insurance

While private insurers can also provide compensation, their potential role as regulators is particularly promising. A well-functioning insurance market can generate useful data and desirable incentives. It can reduce uncertainty for those who might be plaintiffs as well as for those who are regularly defendants. Take two distinct examples: vehicle insurance and product liability insurance.

In the United States, most drivers and vehicle owners are required to carry insurance for harms inflicted with their vehicles. The required coverage varies by state and is generally far less than would be necessary to compensate for a serious injury or death; California, for example, requires only \$15,000 in coverage for injury or death to one person and \$30,000 in coverage for injury or death to more than one person [4]. The companies that offer this insurance tend to be subject to complex regulatory regimes that also vary by state; California even prescribes the primary factors to be used in pricing such insurance [5].

An alternative regime could respond much more flexibly to vehicle automation. Increasing and then enforcing insurance requirements could help internalize more crash costs, compensate injury more fully, shift some recovery from manufacturers toward negligent drivers, and enable consolidation of some product liability claims through subrogation. Reducing consumer-facing restrictions on insurers could free these companies to better tailor their products to reflect the actual risk posed by particular drivers in particular vehicles in particular conditions. This could in turn advantage those automated vehicles that actually represent a safety improvement.

In contrast to drivers, companies are generally not required by law to maintain product liability insurance. Indeed, one of the purposes of the corporate form is to protect shareholders from liability. Requiring such coverage, however, could provide a check on safety by engaging a third-party insurer in a regulatory role: In order to obtain affordable coverage – or coverage at all – a manufacturer would need to persuade the insurer that its products do not pose unreasonable risk. This would be another way to “delegate the safety case,” to quote the section of the same name below.

The regimes created by Nevada and California to regulate automated vehicles already require companies seeking to test their systems on public roads to demonstrate financial capacity beyond typical state insurance requirements. California, for example, requires

\$5,000,000 in the form of a certificate of insurance, a certificate of self-insurance, or a surety bond [3]. While this approach is promising, these heightened insurance requirements should apply to all vehicles rather than merely to automated vehicles undergoing testing. As the section of the same name argues below, such regulation should “raise the playing field” for conventional as well as automated vehicles.

27.3 Force Information-Sharing

27.3.1 Privilege the Concrete

Product development requires understanding, and as necessary shaping, external forces like law. If specific legal obligations, restrictions, or liabilities are impeding automated vehicle technologies, then would-be developers of those technologies should challenge those constraints. In short, they should identify the specific legal changes that they or their products require – and support these arguments with concrete data and careful analysis. If they do not, policymakers should ask why.

Although concerns have been raised for decades about the product liability implications of increasing vehicle automation [17], automakers tend to refer only broadly, if at all, to this potential challenge even as they announce plans to deploy increasingly advanced automation features. This apparent disconnect suggests either that the technologies themselves are not as imminent as popularly believed [22] or that the companies pursuing those technologies are not as concerned about general product liability as is commonly suggested.

In contrast, automakers have acted to address a more narrow liability question related to the installation or modification of automation systems. Several state legislatures have now clarified that, to quote Michigan law [12], manufacturers and subcomponent producers are “not liable and shall be dismissed from any action for alleged damages resulting from” such third-party installations or conversions “unless the defect from which the damages resulted was present” at the time of manufacture. This provision is largely a restatement of common law [22] and, like common law, does not unambiguously contemplate every potential modification claim.¹

Notwithstanding this uncertainty, this experience demonstrates that established automakers can recognize potential legal issues, propose specific legislative remedies, and – with the exception of California [34] – obtain their enactment. To the extent that automated vehicles depend on changes to vehicle codes [19], insurance requirements, or rules of liability, regulators should expect well-reasoned and well-supported arguments from their high-profile developers.

¹ Consider two examples. In the first, the manufacturer fails to warn against a foreseeable modification of its vehicle; might that failure to warn constitute a “defect from which the damages resulted”? In the second, the subcomponent producer designs a sensor that is highly vulnerable to hacking; might that security vulnerability constitute a “defect from which the damages resulted”?

Relying exclusively on companies to advance specific legal changes, however, can tend to preserve the status quo. Unlike conventional cars, low-speed shuttles and delivery robots generally have neither existing markets nor established companies to advocate for them. As a result, these applications of automation have been largely ignored in recent legislative and regulatory initiatives [22]. Accordingly, governments should also consider whether a dearth of specific proposals or concrete data can be explained by an inability rather than a disinclination to participate in the regulatory process.

In a sense, governments should approach policymaking with the same philosophy underlying public support of physical infrastructure and scientific research: Initiate what the private sector cannot or will not do. Broad mandates or basic conditions may be useful in driving or policing innovation, but attempts to closely tailor rules to products that do not yet exist could produce law that is premature and prejudicial.

27.3.2 Delegate the Safety Case

Vehicle automation is putting state regulators in a difficult position. Prominent examples come from Nevada and California, the two states whose departments of motor vehicles were directed to quickly enact regulations governing automated vehicles and automated driving.² These regulations seek both to provide greater legal certainty to the developers of automated systems [16], [26], [31] and to restrict unreasonably dangerous products and practices [23].

Many states, however, already empower regulators to restrict the registration, modification, or operation of road vehicles on the basis of safety [19]. A New York statute, for example, permits the motor vehicle commissioner to “refuse to register any vehicle or class of vehicles for use on the public highways where he determines that the characteristics of such vehicle or class of vehicles make such vehicle or vehicles unsafe for highway operation” [14].

Alternative approaches to deploying automation systems, including pilot projects and aftermarket modifications, may implicate this authority more quickly than would traditional rollouts [22]. Long before the National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) promulgates rules for automated vehicles³ or even conducts investigations into incidents involving them, state regulators may be facing – or at least actively ignoring – the question of whether to revoke the registration of a vehicle retrofitted with a novel automation system.

Answering such a question will inevitably frustrate these regulators [31]. There is no consensus about how to define, or then how to demonstrate, the appropriate level of safety

² Other states have enacted automated driving statutes without expressly requiring this rulemaking.

³ NHTSA has historically promulgated performance standards only for safety technologies that have already been widely deployed, although the eventual regulation of vehicle-to-vehicle (V2V) communications systems is likely to be an exception.

for an automated vehicle or for the human-machine system to which it may belong [25]. Moreover, the kind of regulation that is appropriate for an established automaker may differ considerably from the kind that is appropriate for a small startup or an individual tinkerer [22].

Although state vehicle agencies generally lack NHTSA's technical resources, they may have more regulatory flexibility. Federal motor vehicle safety standards (FMVSSs) are restricted to objective measures and to tests "capable of producing identical results when test conditions are exactly duplicated" [7], quoted in [35].

In contrast, state agencies may be bound by less demanding requirements of administrative process, which may afford them the discretion needed to gradually develop consistent practice. This flexibility could enable state regulators to address specific technologies without entrenching rules that are likely to become anachronistic and irreconcilable with those of other states.

To this end, "delegating the safety case" would mean requiring the developer of a vehicle automation system to publicly make and defend arguments about how well its system should perform and how well its system actually performs. In short:

1. A manufacturer documents its actual and planned product design, testing, and monitoring.
2. The manufacturer publicly presents this documentation in the form of a safety case.
3. The regulatory agency and interested parties comment on this safety case.
4. The manufacturer publicly addresses these comments.
5. The agency determines that the manufacturer has presented a reasonable safety case.
6. The manufacturer certifies that its product adheres to its safety case.
7. The manufacturer sells that product.

This process draws on several existing models, including the type approval (or homologation) typical in the European Union and the self-certification prescribed by US law. It could accommodate the kind of process standards used in ISO 26262, the kind of alternatives discussion characteristic of environmental impact statements, and the kind of public dialogue foundational to notice-and-comment rulemaking.

By encouraging companies to disclose information necessary to their safety case, such an approach could help educate regulators and the broader public about the capabilities and limitations of these emerging technologies. Although disclosure could justifiably concern some developers, this process would not require the disclosure of all information, only that which is necessary to demonstrate a reasonable safety case. What is reasonable will likely evolve, and this approach could afford companies greater flexibility to make nontraditional arguments for the safety of their systems and regulators greater flexibility to adapt to changing capabilities.

Because flexibility can also mean uncertainty, early collaboration between regulators and developers may be necessary to avoid all-or-nothing approval decisions at the end of product development. Regardless, uncertainty is not a new concern: Whatever clarity that the current

federal regime offers through self-certification to specific standards is diminished by the recalls and lawsuits that can arise years or even decades after a vehicle has been sold.

Indeed, unlike current federal motor vehicle safety standards, a safety case could contemplate the entire product lifecycle. A developer might describe not only the steps it had taken to ensure reasonable safety at the time of sale but also the steps it would continue to take as it learned more about performance in the field.

27.4 Simplify the Problem

27.4.1 Limit the Duration of Risk

The potential longevity of any motor vehicle – the “average” age of cars in the United States is more than eleven years [15] – can create uncertainty for its manufacturers [21] and safety concerns for the public [26]. In 2013, Chrysler reluctantly recalled some Jeeps that were twenty years old [9], [13]. More generally, newer vehicles tend to be safer than older vehicles; “improvements made after the model year 2000 fleet prevented the crashes of 700,000 vehicles; prevented or mitigated the injuries of 1 million occupants; and saved 2,000 lives in the 2008 calendar year alone” [8].

This uncertainty may be particularly great in the case of automated vehicles [21]. Even extensive testing may not capture the full range of scenarios that these vehicles could face. Manufacturers may have difficulty predicting “the eventual response of judges, juries, regulators, consumers, and the public at large to incidents that will inevitably occur” [28]. Regulators may be “concerned that, first, isolated incidents involving these products will create feelings of helplessness and panic that unjustifiably stymie their wider adoption and that, second, these early products will still be around years later when they are much less safe than whatever has become state of the art” [26].

A promising response to these challenges is a lifecycle approach to vehicle design that seeks to limit the duration of risk. For the private sector, this could entail over-the-air updates, end-user license agreements, leasing arrangements, and a variety of other technical and legal tools to enable manufacturers to update or even forcibly retire systems in which they no longer have confidence [21]. For the public sector, this could mean requiring companies to document a strategy and a capacity for monitoring the long-term safety of their systems. Such documentation could be a key part of the safety case introduced above.

27.4.2 Exclude the Extreme

The aphorism that “the perfect is the enemy of the good” [33] is instructive for vehicle automation. Demanding perfection may impede the development or deployment of systems that, while not perfect, nonetheless represent a significant improvement over conventional vehicles. Excessive design demands, for example, might preclude an automated vehicle

that could avoid many of the common errors of human drivers but that could not avoid catastrophic multicar freeway pileups to the extent physically possible. In other words, it may be prudent to accept some failures in order to expedite larger successes.

Moreover, attempting to design an automated vehicle to handle every conceivable driving scenario may introduce complexity that is poorly understood, unmanageable, and ultimately detrimental to safety. Again, for example, designing an automated vehicle to rapidly accelerate through a pileup-in-progress might lead to programming oversights that could cause that same vehicle to errantly speed up after entering a closed construction zone. Here it may be prudent to accept some failures in order to prevent even more catastrophic failures.

For both of these reasons, early generations of automated vehicles may necessarily limit the technical challenges that they attempt to solve. These vehicles might be deployed into simplified environments at lower speeds [22]. Or they might continue to rely in part on human drivers [29], particularly if those humans are professionals who can be carefully trained, closely monitored, and sufficiently incentivized.

Sound engineering may demand additional limitations. For example, it may be prudent to program an automated vehicle to never speed, to always slow to a stop in the event of a detected failure, or to always permit human override within a set number of seconds. These stylized examples might mean that, in occasional cases, an automated vehicle will crash because it has failed to accelerate or because it has stopped or because its human driver has made poor decisions while panicking.

Although these should be primarily technical determinations, law may be able to play a supporting role. In some jurisdictions, for example, the plaintiff in a product liability case must demonstrate that an alternative product design was available and superior to the one alleged to have contributed to her injury. In such a case, it may be appropriate to give more weight to counterarguments about the complexity, uncertainty, and delay inherent in such designs.

There are, however, two important cautions. First, for those injuries that do occur, this strategy merely shifts more of the risk to those people who have been injured. This consequence highlights the need for a sufficient social safety net, whether provided through public insurance, private insurance, or another means. Second, codifying a ceiling on the performance required could mean calcifying the level of reasonable design for technologies that may quickly be capable of much more.

27.5 Raise the Playing Field

27.5.1 Reject the Status Quo

The reality that human drivers often violate rules of the road prompts speculation that programming automated vehicles to comply with these rules would reduce their appeal. Suggestions for addressing this perceived disadvantage have included expressly permitting

automated vehicles to travel at or above the prevailing traffic speed and delegating decisions about speed or aggression to the human users of these vehicles.

Drivers, however, currently behave in ways that are neither lawful nor reasonable [20]. They drive too fast for conditions, they follow other vehicles too closely, and they fail to yield the right of way to pedestrians. They drive while intoxicated or distracted. They fail to properly maintain their vehicles' tires, brakes, and lights. These largely unlawful behaviors occasionally result in crashes, and those crashes occasionally result in serious injury. This tragic status quo suggests that the current approach to traffic enforcement should be reformed rather than transferred to automated vehicles.

At this early stage in automation, transportation authorities would do better to optimize and then enforce rules of the road for all motor vehicles. Increasing the expectations placed on human drivers – by cracking down on speeding, texting, drunk driving, and other dangerous activities – could increase the appeal of automated vehicles at least as much as allowing those automated vehicles to speed.

Automated enforcement could be a key tool for increasing compliance. Such enforcement currently relies both on roadway devices (including speed and red light cameras) and on in-vehicle devices (including alcohol locks, speed regulators, and proprietary data recorders). Private entities such as fleet managers and insurance companies already provide some of this enforcement indirectly through private incentives. The potential proliferation of outward-facing cameras on vehicles and drones in the air might also facilitate increased public and private enforcement of rules of the road.

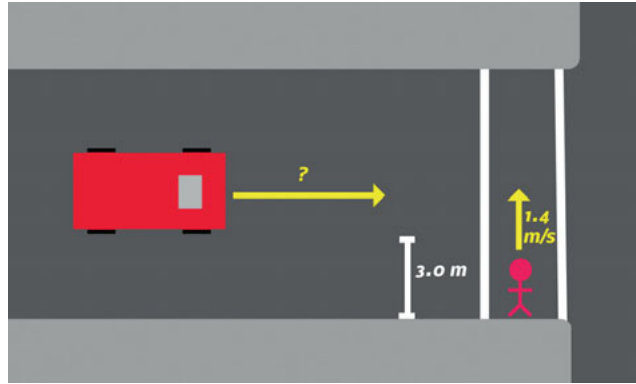
Increased enforcement could, on one hand, address equity concerns of discretionary enforcement and, on the other hand, raise privacy and liberty concerns. While these are important questions, a status quo in which laws are openly flouted even by the officers enforcing them is one that begs for reform.

Indeed, more consistent and comprehensive enforcement could create pressure for a careful evaluation of existing law. Better access to and analysis of location-specific information about the driving environment (including roadway geometry, pavement, traffic, and weather) could enable the precise calibration of dynamic speed limits. These dynamic limits might then be communicated to drivers through variable message signs and, in the future, vehicle-to-infrastructure communication.

Because reasonable speed also depends on the driver and her vehicle, posted limits might nonetheless have only limited utility. Pursuant to the basic speed law [20], a human driver should account for each of these variables implicitly and adjust her speed accordingly. Automated vehicles, however, may account for more of these variables explicitly – and reasonably.

Consider, for example, the common requirement that the “driver of a vehicle shall yield the right-of-way to a pedestrian crossing the roadway within any marked crosswalk or ... unmarked crosswalk at an intersection, except as otherwise provided” [6]. Although pedestrians may not create an “immediate hazard” by “suddenly” leaving the curb [6], the statutory obligation to yield does suggest one possible bound on vehicle speed.

Figure 27.2 Illustration of Vehicle Stopping



Imagine a driver traveling down a typical neighborhood street with a parking lane that provides 3 m between her car and the curb, as shown in Figure 27.2. Assuming that her view of the pedestrian is not blocked, what maximum speed will enable this driver to stop for any pedestrian who, at a walking speed of 1.4 m/s, steps from the curb into the street?

Although stopping sight distance depends on several vehicle, environment, and driver variables [1], this illustration simplifies these to consider only the driver's reaction time and the friction between the tires and the road surface. An average driver with good tires on a flat dry street might achieve a reaction time of 1 s and a subsequent deceleration rate of 5 m/s^2 , which implies a maximum speed of 20 km/h (13 mph).⁴ In contrast, a hypothetical automated vehicle reacting twice as fast and braking at 7 m/s^2 could reach a maximum speed of about 40 km/h (25 mph),⁵ which is a typical residential speed limit today. In other words, if automated vehicles are traveling slowly on a road, perhaps conventional vehicles should be traveling even more slowly.

Reasonable speed is also an answer to some, though not all, of the ethical dilemmas popularly raised in the context of automated driving [10], [32]. Positing a choice between killing one group of pedestrians and another, for example, fails to account for the possibility of negating the dilemma simply by driving more slowly. Slower speeds can increase controllability as well as reduce the magnitude of harm.

Speed is not the only relevant driver action. Tire condition, for example, is an important consideration in stopping distance, is at least nominally regulated [2], and yet varies widely within the current vehicle fleet. If the hardware on automated vehicles is expected to be regularly inspected, so too should the hardware on conventional vehicles. Moreover,

⁴ initial speed = rate of deceleration * ((pedestrian speed / orthogonal distance from curb to car) - reaction time) = $(0.5 * 9.8 \text{ m/s}^2) * (((1.4 \text{ m/s}) / 3 \text{ m}) - 1 \text{ s}) = 6 \text{ m/s} = 20 \text{ km/h} = 13 \text{ mph}$.

⁵ initial speed = rate of deceleration * ((pedestrian speed / orthogonal distance from curb to car) - reaction time) = $(0.7 * 9.8 \text{ m/s}^2) * (((1.4 \text{ m/s}) / 3 \text{ m}) - 0.5 \text{ s}) = 11 \text{ m/s} = 41 \text{ km/h} = 25 \text{ mph}$.

driving imposes environmental costs that are not internalized by vehicle owners and operators [18]. If automated driving proves to be more fuel efficient than human driving, a higher fuel tax would also incentivize automation.

In short, reform should seek to more closely align what is lawful with what is reasonable and to more closely align actual driver behavior with both [20]. The expectation that both automated vehicles and human drivers should behave reasonably is itself reasonable and ultimately advantageous to automated driving.

27.5.2 Embrace Enterprise Liability

Although vehicle automation will change the way some cases are litigated and resolved, manufacturers are likely to continue to successfully manage their product liability [28]. Uncertainty about liability is probably more of an impediment to product deployment than actual exposure to liability – and there are strategies that companies can take to manage that uncertainty [21].

This confidence, however, is not universal [11]. A more skeptical view even has precedent: The National Childhood Vaccine Injury Act of 1986 was passed in response to similar concerns that traditional product liability had rendered some vaccines uneconomic for their would-be producers. The regime it created “combines procedural and substantive limitations on conventional tort remedies with an alternative compensation scheme for probable victims of covered vaccines” [21].

If product liability exposure does impede the deployment of automated vehicles, a similar regime might be an effective response. However, that is by no means the only conceivable alternative.

Rather than limiting liability for the manufacturers of automated systems, courts or legislatures could expand liability for everyone else. This is counterintuitive and, as a legislative proposal, unlikely to go anywhere. Nonetheless, consider the consequences of introducing a system of enterprise liability in which manufacturers are liable for all harm associated with their products. In other words, what would be different if automakers could be successfully sued for every crash involving their product rather than just the small fraction in which a vehicle defect contributed to the injury?

Some effects would be undesirable. Automakers might outright refuse to sell their vehicles in any jurisdiction with enterprise liability. Others would demand higher prices to cover their increased costs. This could in turn mean less access for consumers, particularly those with limited resources.

Other effects, however, might arguably be more desirable. No longer would dealers simply hand over car keys to new buyers. Instead, manufacturers might require these buyers to complete more thorough driver training customized for the particular vehicle. Technologies like alcohol-sensing ignition locks and speed regulators might become standard. Older vehicles might be promptly removed from roads as safer systems are introduced. A notable result could be safer roads.

Another result could be greater automation: Given the choice between paying for the mistakes of their own technologies and paying for the mistakes of their disparate customers, many companies would likely opt for their technology. Automation would become a solution to rather than merely a source of litigation.

Even if pure enterprise liability remains a thought experiment, its principles are evident in other areas relevant to automation. Fleet operators are an attractive market for automated vehicles in part because they are already liable for injuries caused by the negligence of their drivers. Automation may also offer near-term financial or market advantages to insurers, which similarly pay for injuries caused by their insured.

More broadly, as manufacturers gain and assert more control over the products they have sold through technology and contract, they may also incur greater legal obligations in tort [21]. These obligations, which might approach enterprise liability without actually reaching it, could have a similar effect on design decisions. Eventually, selling a vehicle that lacks safety-critical automation features might itself be unreasonable.

27.6 Conclusion

This chapter began with two fundamental questions: How should risk be allocated in the face of significant uncertainty – and who should decide? Its focus on public actors reflects the significant role that legislatures, administrative agencies, and courts will play in answering these questions, whether through rules, investigations, verdicts, or other forms of public regulation.

The eight strategies discussed above would in effect regulate that regulation. They seek to ensure that those who are injured can be compensated, that any prospective rules develop in tandem with the technologies to which they would apply, that reasonable design choices receive sufficient legal support, and that conventional driving is subject to as much scrutiny as automated driving. Table 27.2 (below) summarizes.

Table 27.2 Potential Regulatory Strategies

Ensure sufficient compensation for those who are injured	
Expand public insurance	Facilitate private insurance
Force information-sharing by the private sector to enhance regulation	
Privilege the concrete	Delegate the safety case
Simplify both the technical and the regulatory challenges in coordination	
Limit the duration of risk	Exclude the extreme
Raise the playing field for conventional actors along with automated systems	
Reject the status quo	Embrace enterprise liability

This focus on public actors does not diminish the important roles that private actors play in innovation and in regulation. Indeed, several of the strategies discussed above expressly embrace these roles. In this spirit, a challenge for – and to – developers of automated systems is to contribute fully and publicly to the broader discussions for which these strategies are intended.

References

1. AASHTO, *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets (Green Book)*, 6th Edition (2011)
2. Blythe, William and Seguin, Debra E., *Commentary: Legal Minimum Tread Depth for Passenger Car Tires in the U.S.A. – A Survey*, *Traffic Injury Prevention*, vol. 7, issue 2 (2006)
3. California DMV Regulations, Title 13, § 227
4. California Insurance Code § 11580.1b
5. California Proposition 103 (1988)
6. California Vehicle Code § 21950
7. *Chrysler Corp. v. Dept. of Transp.*, 472 F.2d 659, 676 (6th Cir. 1972)
8. Glassbrenner, Donna, *An Analysis of Recent Improvements to Vehicle Safety*, <http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/Pubs/811572.pdf>
9. Keane, Angela Greiling, *Chrysler Refusal on Jeeps Sets Challenge to Recall Power*, June 7, 2013, <http://www.bloomberg.com/news/2013-06-07/chrysler-refusal-on-jeeps-sets-challenge-to-recall-power.html>
10. Lin, Patrick, *Why Ethics Matters for Autonomous Cars*, in this book
11. Marchant, Gary E. and Lindor, Rachel A., *The Coming Collision Between Autonomous Vehicles and the Liability System*, *Santa Clara Law Review* (2012)
12. Michigan Compiled Laws Sec. 22949b
13. NHTSA Letter from Jennifer Timian, NHTSA, to Matthew Liddane, Chrysler Group LLC, June 21, 2013, <http://www-odi.nhtsa.dot.gov/acms/cs/jaxrs/download/doc/UCM440558/RCAK-13V252-1688.PDF>
14. N.Y. VEH. & TRAF. LAW § 400 (McKinney 2013)
15. Press Release, Polk, *Polk Finds Average Age of Light Vehicle Continues to Rise* (Aug. 6, 2013), https://www.polk.com/company/news/polk_finds_average_age_of_light_vehicles_continues_to_rise
16. Pritchard, Justin, *How Google Got States to Legalize Driverless Cars*, <http://bigstory.ap.org/article/how-google-got-states-legalize-driverless-cars> (2014)
17. Roberts, Stephen N., Hightower, Alison S., Thornton, Michael G., Cunningham, Linda N., and Terry, Richard G., *Advanced Vehicle Control Systems: Potential Tort Liability for Developers*, FHWA Contract DTFH61-93-C-00087 (Dec. 1, 1993)
18. Small, Kenneth A. and Kazimi, Camilla, *On the Costs of Air Pollution from Motor Vehicles*, *Journal of Transport Economics and Policy* (1995)
19. Smith, Bryant Walker (2014a), *Automated Vehicles Are Probably Legal in the United States*, 1 *Texas A&M Law Review* 411 (2014), <http://newlypossible.org>
20. Smith, Bryant Walker (2014b), *Lawyers and Engineers Should Speak the Same Robotic Language*, forthcoming in *Robot Law* (2014), <http://newlypossible.org>
21. Smith, Bryant Walker (2014c), *Proximity-Driven Liability*, 102 *Georgetown Law Journal* 1777 (2014), <http://newlypossible.org>

22. Smith, Bryant Walker (2014d), A Legal Perspective on Three Misconceptions in Vehicle Automation, in Sven Beiker and Gereon Meyer, *Vehicle Automation*, Springer Lecture Notes in Mobility (2014), <http://newlypossible.org>
23. Smith, Bryant Walker (2014e), Something Interesting in California's New Automated Vehicle Testing Rule, <http://cyberlaw.stanford.edu/blog/2014/05/something-interesting-californias-new-automated-vehicle-testing-rule>
24. Smith, Bryant Walker (2013a), Taxonomy of Regulation (TRB), reprinted in *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (2014)
25. Smith, Bryant Walker (2013b), The Reasonable Self-Driving Car, <http://www.volokh.com/2013/10/03/reasonable-self-driving-car>
26. Smith, Bryant Walker (2013c), Automated Vehicles Are Probably Legal in the United States, <http://cyberlaw.stanford.edu/blog/2013/04/automated-vehicles-are-probably-legal-united-states>
27. Smith, Bryant Walker (2013d), Planning for the Obsolescence of Technologies Not Yet Invented, <http://cyberlaw.stanford.edu/blog/2013/10/planning-obsolescence-technologies-not-yet-invented>
28. Smith, Bryant Walker (2013e), Uncertain Liability, <http://cyberlaw.stanford.edu/blog/2013/05/uncertain-liability>
29. Smith, Bryant Walker (2013f), SAE's Levels of Driving Automation, <http://cyberlaw.stanford.edu/loda>
30. Smith, Bryant Walker (2012a), Autolaw 3.0, TRB Workshop on Road Vehicle Automation (2012)
31. Smith, Bryant Walker (2012b), How an (Autonomous Driving) Bill Becomes Law, <http://cyberlaw.stanford.edu/events/how-autonomous-driving-bill-becomes-law>
32. Smith, Bryant Walker (2012c), Driving at Perfection, <http://cyberlaw.stanford.edu/blog/2012/03/driving-perfection>
33. Voltaire, *La Béguéule*
34. Weiner, Gabriel and Smith, Bryant Walker, Automated Driving: Legislative and Regulatory Action, http://cyberlaw.stanford.edu/wiki/index.php/Automated_Driving:_Legislative_and_Regulatory_Action
35. Wood, Stephen P., Chang, Jesse, Healy, Thomas, and Wood, John, The Potential Regulatory Challenges of Increasingly Autonomous Motor Vehicles, 52 *Santa Clara Law Review* 1423 (2012)

Entwicklungs- und Freigabeprozess automatisierter Fahrzeuge: Berücksichtigung technischer, rechtlicher und ökonomischer Risiken

28

Thomas Winkle

Inhaltsverzeichnis

28.1 Einleitung	612
28.1.1 Motivation	612
28.1.2 Fragen an die Produktsicherheit zunehmender Fahrzeugautomatisierung	612
28.1.3 Technische Weiterentwicklung von Assistenzsystemen – neue Möglichkeiten und Risiken	613
28.2 Erwartungen an die Sicherheit komplexer Fahrzeugtechnik	614
28.2.1 Gesteigerte Verbrauchererwartungen an die Fahrzeugsicherheit	614
28.2.2 Risiken und Nutzen automatisierter Fahrzeuge	615
28.3 Rechtliche Anforderungen und Auswirkungen	615
28.3.1 Allgemein anerkannte Regeln der Technik (aaRdT)	617
28.3.2 Produktsicherheitsgesetz (ProdSG)	617
28.3.3 Produkthaftungsgesetz (ProdHaftG)	618
28.4 Erhöhung der Produktsicherheit automatisierter Fahrzeuge auf der Basis von Expertenerfahrungen aus Haftungs- und Gewährleistungsansprüchen	619
28.4.1 Erfahrungen aus Produktkrisen	619
28.4.2 Wesentliche Fragen aus bisherigen Produkthaftungsfällen	621
28.4.3 Potenzielle Gefahrensituationen zu Beginn der Entwicklung	622
28.4.4 Methoden zur Risikobewertung während der Entwicklung	623
28.4.5 Prüfkriterien durch Expertenwissen	626
28.4.6 Schritte zur Erhöhung der Produktsicherheit automatisierter Fahrzeuge im allgemeinen Entwicklungsprozess	627
28.4.7 Produktbeobachtung nach der Markteinführung	629
28.4.8 Bewertung des Risikos möglicher Funktionsfehler nach der Markteinführung ...	629
28.5 Fazit und Ausblick	631
Literatur	633

T. Winkle (✉)

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

28.1 Einleitung

Die Leistungsfähigkeit von Sensortechnologie und Datenverarbeitung verbessert sich fortlaufend. Dadurch lassen sich eine kontinuierliche Weiterentwicklung von Fahrerassistenzsystemen und die zunehmende Automatisierung von Fahraufgaben bis hin zu selbstfahrenden Fahrzeugen realisieren [1].

28.1.1 Motivation

Im Zuge dieser Entwicklung werden technische und elektronische Systeme um ein Vielfaches komplexer und stellen zukünftig Fahrzeughersteller und Entwickler vor neue Herausforderungen. Insbesondere ein Wechsel von der bislang durch Menschen gesteuerten hin zu einer hoch- bzw. vollautomatisierten Fahrzeugführung wirft grundsätzliche Fragen zur Verantwortung oder Haftung auf. Dies erfordert neue Ansätze – in erster Linie neue Sicherheits- und Testkonzepte [2]. Aus rechtlicher Sicht erfordern automatisierte Fahrzeuge zur Minimierung der Risiken sorgfältige Sicherungsmaßnahmen bei der Entwicklung [3]. Diese müssen Nutzer akzeptieren. Laut einem Urteil des Bundesgerichtshofs (BGH) müssen sie auch nach dem jeweils neuesten Stand der Wissenschaft und Technik – innerhalb der Grenzen des technisch Möglichen und wirtschaftlich Zumutbaren – konstruktiv möglich sein sowie geeignet und genügend erscheinen, um Schäden zu verhindern [4].

28.1.2 Fragen an die Produktsicherheit zunehmender Fahrzeugautomatisierung

Medienberichte über automatisierte Forschungsfahrzeuge von Automobilherstellern, Zulieferern und IT-Unternehmen weisen seit Jahren auf die Vorbereitung einer Serienentwicklung hin. Für eine Markteinführung fehlen jedoch noch mehrere Voraussetzungen. Eine zunehmende Automatisierung von Fahrfunktionen erfordert modernste, hochkomplexe Technologien. Insbesondere durch die Nutzung elektrischer/elektronischer Komponenten muss mit unvorhersehbaren Reaktionen gerechnet werden, die im Extremfall auch zu Schäden an Leib und Leben führen können. Aktuell zieht eine Vollautomatisierung der Fahraufgaben bei fahrerlosen Fahrzeugen (vgl. [3]) ohne einen verantwortlichen Fahrer als Rückfallebene aufgrund der zunehmenden Komplexität schwer überschaubare Risiken nach sich. Dazu kommen neue Haftungsfragen und eine begrenzte Toleranz bei technischen Ausfällen. Während in Deutschland zurzeit jährlich über 3000 Unfalltote im Straßenverkehr gesellschaftlich offenbar akzeptiert sind, fehlt womöglich jegliche Toleranz bei einem Unfalltoten, der im Zusammenhang mit vermeintlichen technischen Fehlern steht. Obwohl eine Automatisierung des Fahrens ein erhebliches Sicherheitspotenzial verspricht, wird eine übergreifende Vermarktung fahrerloser Fahrzeuge erst erfolgen, wenn eine Klärung der Haftungsfragen und der Verantwortung bei technisch verursachten Schäden

erfolgt ist. Gesellschaftliche Akzeptanz entsteht u. a. erst dann, wenn der wahrgenommene individuelle Nutzen die erlebten Risiken deutlich überwiegt.

Eine vertiefte Analyse der zu beachtenden Risiken automatisierter Fahrzeuge auf der Basis langjähriger Forschungs- und Produkthaftungserfahrungen liefert Grundlagen für die Vorbereitung ihrer zukünftigen Großserienentwicklung und Vermarktung. Daraus leiten sich Empfehlungen zur Sicherheitsbewertung ab. Bislang sind unter anderem folgende Fragen ungelöst:

- Welche Anforderungen sind für eine Entwicklung und Vermarktung sicherer automatisierter Fahrzeuge zu berücksichtigen?
- Wie sicher ist sicher genug?
- Unter welchen Bedingungen ist ein automatisiertes Fahrzeug fehlerhaft?
- Wie wird die Sorgfaltspflicht bei der Entwicklung sichergestellt?

28.1.3 Technische Weiterentwicklung von Assistenzsystemen – neue Möglichkeiten und Risiken

Aus technischer Sicht können automatisierte Fahrzeuge bereits heute Fahraufgaben im Verkehrsgeschehen selbstständig übernehmen. Aktuelle Serienfahrzeuge mit optimierter Sensor-, Computer- und Fahrwerkstechnik ermöglichen zunehmend leistungsfähigere Assistenzsysteme. Einige der heute angebotenen Fahrerassistenzsysteme warnen bei erkannten Gefahren im Längs- oder Querverkehr (z.B. Fahrstreifenverlassenswarnung, Kollisions-, Fahrstreifenwechsel, Nachtsicht- oder Kreuzungsassistent). Andere greifen in die Längs- oder Querdynamik ein (z.B. Antiblockiersystem – ABS, Electronic Stability Control – ESC, Adaptive Cruise Control – ACC). Park-Lenk-Assistenten ermöglichen erhöhten Komfort durch Lenk- und Bremsengriffe im Niedergeschwindigkeitsbereich. Diese teilautomatisierten Fahrzeugsysteme mit temporärer Längs- und Querführungsassistenz werden heute in Serienfahrzeugen ausschließlich unter Annahme der Kontrollierbarkeit eines aufmerksamen Fahrers angeboten. Die Überwachung durch den Fahrzeugführer ist erforderlich. Somit sind Systemeinschränkungen oder -ausfälle dieser Advanced Driver Assistance Systems – ADAS während des normalen Betriebs an den und außerhalb der Systemgrenzen über den Nachweis der Beherrschbarkeit durch den Fahrer abgedeckt (vgl. [5, 6]).

Beim vollautomatisierten Fahren hingegen steht der Fahrer nicht mehr als Rückfallebene für technische Systemeinschränkungen und Fehler zur Verfügung. Dieser Ersatz menschlich eigenverantwortlichen Handelns durch eine programmierte Maschine bringt technische und rechtliche Risiken sowie Herausforderungen an die Produktsicherheit mit sich. Jedoch lassen sich zukünftige Erwartungen an fahrerlose Fahrzeuge – auch in einer möglichen Umbruchsituation – nur anhand bisheriger Erfahrungen beschreiben. Deshalb werden im Folgenden Analogien auf der Grundlage vergangener und aktueller Erwartungen an die Fahrzeugsicherheit gezogen.

28.2 Erwartungen an die Sicherheit komplexer Fahrzeugtechnik

28.2.1 Gesteigerte Verbrauchererwartungen an die Fahrzeugsicherheit

Vollautomatisierte Fahrzeuge müssen am heute weltweit hohen Niveau des Verbraucherbewusstseins für Mängel an Kraftfahrzeugen gemessen werden. Seit dem Jahr 1965 entwickelte sich, verstärkt durch das Buch *Unsafe at Any Speed: The Designed-In Dangers of the American Automobile*, zunehmend ein kritisches Bewusstsein gegenüber der Automobilindustrie [7, 8]. In dieser Veröffentlichung wirft der Autor Ralph Nader den Fahrzeugherstellern Einsparungen bzw. Sorgfaltspflichtverletzungen zulasten einer sicheren Konstruktion und Herstellung vor. Die Darstellung von Sicherheits- bzw. Konstruktionsmängeln bei General Motors und anderen Herstellern schreckte die Öffentlichkeit auf. Im Nachgang gründete Nader das „Center for Study of Responsive Law“, das Kampagnen gegen die *Big Three* der US-Autobauer, den Volkswagen-Konzern und andere Automobilkonzerne startete. In der Folge wurden technische Konzepte überarbeitet und optimiert. Im Mittelpunkt von Naders Kritik stand der Chevrolet Corvair. Unter anderem kritisierte Nader die unsichere Fahrdynamik durch den Heckmotor sowie die Pendelachse. Diese veränderte beim Aus- bzw. Einfedern den Sturz der Räder (Neigung gegenüber der Senkrechten). Durch eine Konstruktionsänderung mit einer mehrfach gelagerten Achse bleibt dagegen die Neigung weitgehend gleich, was zu einem stabileren Fahrverhalten führt. Später stand aus ähnlichen Gründen der VW Käfer wegen seiner Seitenwindempfindlichkeit in der Kritik. Auch er war mit Heckmotor und Pendelachse ausgerüstet. Als technische Verbesserung löste der VW Golf mit Frontmotor und stabilerem Fahrverhalten (Markteinführung 1974) den VW Käfer ab.

Neben der Entwicklung neuer und fahrsicherer Fahrzeugkonstruktionen wurde als eine weitere Folge dieser Kritik im Jahr 1970 die US National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) gegründet. Angesiedelt innerhalb des Department of Transportation – auf der Grundlage des „Highway Safety Act of 1970“ – verbessert sie die Straßenverkehrssicherheit. Sie hat es sich zur Aufgabe gemacht, Menschenleben zu schützen, Verletzungen vorzubeugen und Fahrzeugunfälle zu reduzieren. Weiterhin bietet sie dem Verbraucher fahrzeugspezifische Sicherheitsinformationen, die vorher nicht allgemein zugänglich waren. Darüber hinaus begleitet die NHTSA bis heute zahlreiche Untersuchungen automobiler Sicherheitssysteme. Sie hat u. a. die verpflichtende Einführung eines automatisiert eingreifenden Fahrdynamikregelsystems (Electronic Stability Control – ESC) aktiv gefördert. Parallel zu den Aktivitäten der NHTSA zeigt auch die Statistik des Kraftfahrtbundesamtes einen zunehmend sensibleren Umgang mit sicherheitsrelevanten Mängeln durch die Begleitung oder Anordnung von Rückrufaktionen [9]. Mittlerweile bestehen höchste Erwartungen an die Sicherheit von Kraftfahrzeugen. Das äußert sich in einer umfangreichen Sicherheitsausstattung, die heute fast weltweit in jedem Serienfahrzeug erwartet wird. Dazu gehören u. a. das Antiblockiersystem (ABS), Airbags oder eine Fahrdynamikregelung bzw. Electronic Stability Control. Die Häufigkeit von Rückrufaktionen hat zugenommen, obwohl die allgemeine Zuverlässigkeit und Funktionssicherheit

von Personenkraftwagen gleichzeitig deutlich gesteigert werden konnte. Dauertests in Fachzeitschriften wie *Auto Motor und Sport* zeigen: Eine Distanz von 100.000 Kilometern ist immer häufiger ohne Panne, außerplanmäßigen Werkstattaufenthalt, defektes Funktionsteil und ohne jeglichen geringfügigen Defekt zu bewältigen.

28.2.2 Risiken und Nutzen automatisierter Fahrzeuge

Automatisierte Fahrzeuge werden gesellschaftlich wohl nur dann akzeptiert, wenn der wahrgenommene *Nutzen* (abhängig vom *Wirkungsgrad: Driver* versus *Robot*) gegenüber den erwarteten *Risiken* (abhängig vom *Automatisierungsgrad: Wirkungsfeld* versus *Effektivfeld*) überwiegt. Zur Verringerung der Risiken führen Hersteller eine *Unfalldatenanalyse* und ein entsprechendes *Risikomanagement* durch (s. Abb. 28.1).

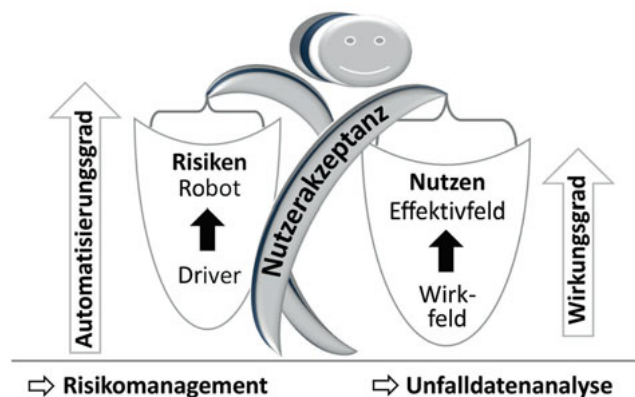
Für Automobilhersteller und Zulieferer sind automatisierte Fahrzeuge eine Produktinnovation mit Marktpotenzial. Bei Investitionsentscheidungen und Markteinführungen sind jedoch schwer kalkulierbare Risiken zu bewerten:

- Wird das Markenimage nachhaltig geschädigt, wenn das automatisierte Fahrzeug nicht den Verbrauchererwartungen entspricht?
- Welche Mängel können zu Rückrufaktionen führen?
- Welches Risiko von Produkthaftungsansprüchen besteht, wenn das automatisierte Fahrzeug nicht den Anforderungen eines sicheren Produkts entspricht?

28.3 Rechtliche Anforderungen und Auswirkungen

Die gesellschaftlichen und individuellen Erwartungen an die technische Perfektion von Fahrzeugen steigen. So verlangen zunehmende Anforderungen an Fahrzeugqualität und Funktion entsprechend hohe Sicherheitsmaßstäbe bei einer Einführung automatisierter Fahrzeuge. Dies zeigt sich beispielsweise durch die Zunahme von Rückrufaktionen trotz

Abb. 28.1 Gesellschaftliche und individuelle Nutzerakzeptanz stellt sich kontextbezogen ein, indem wahrgenommene Nutzungsoptionen mit Risikobefürchtungen gegeneinander abgewogen werden (s. Kap. 29, 30). Risiken hängen ab vom Automatisierungsgrad und der Nutzen vom Wirkungsgrad. Risikomanagement sowie Unfalldatenanalysen (s. Kap. 17) ermöglichen Optimierung und Objektivierung (s. Kap. 30)



steigender Fahrzeugzuverlässigkeit oder zusätzliche Vorgaben zur Durchführung übergreifender Sicherheitskampagnen (z.B. Motor Vehicle Safety Defects and Recalls Campaigns) oder neue Dokumentationspflichten seitens der Behörden. Ein Beispiel ist das Bundesgesetz „Transportation Recall Enhancement, Accountability and Documentation (TREAD) Act“ in den Vereinigten Staaten [10], das eine Reihe neuer und weitergehender Pflichten zur Aufbewahrung von Unterlagen und Meldungen an die Verkehrssicherheitsbehörde National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) einführte. Gleichzeitig werden menschliche Fehler im Straßenverkehr individuell sanktioniert, ohne dass das Verkehrssystem an sich infrage gestellt wird.

Hochkomplexe Technologien und abweichende Definitionen verlangsamten eine Einführung automatisierter Fahrzeuge. Hinzu kommen verschiedenartige technische Vorgaben im interdisziplinären Kontext. In der Vergangenheit konnten sich Entwickler nachvollziehbar an Vorgaben, wie den „allgemein anerkannten Regeln der Technik“, der „Branchenüblichkeit“ oder dem „Stand der Technik“ orientieren. Der Bundesgerichtshof (BGH) wollte mit seiner Entscheidung vom 16.06.2009 die Anforderungen deutlich erhöhen und prägte für die Automobilindustrie überraschend den Begriff vom neuesten „Stand von Wissenschaft und Technik“. Dies stellt Entwickler vor zusätzliche Herausforderungen. Funktionen, die heute in Forschungsfahrzeugen zu wissenschaftlichen Zwecken unter Laborbedingungen möglich sind, erfüllen bei Weitem nicht die Erwartungen an ein Serienfahrzeug, wie beispielsweise Schutz vor Kälte, Hitze, Erschütterung, Wasser oder Schmutz.

Aus der Sicht eines Entwicklers werden diese rechtlichen Anforderungen an eine sorgfältige Entwicklung neuer komplexer Systeme erst nach definierten Absicherungstests erfüllbar. Diese sollten idealerweise international einheitlich abgestimmt sein. Das BGH-Urteil von 2009 begründet die Entwicklungsanforderung – vorbehaltlich der wirtschaftlichen und technischen Eignung zum Serieneinsatz – mit „... allen konstruktiv möglichen Sicherheitsvorkehrungen ...“ unter dem „Stand von Wissenschaft und Technik“ [4] auf der Basis eines Beweissicherungsgutachtens. Dieses fordert jedoch Ultraschallsensoren als Redundanz bei der Erkennung von relevanten Objekten zur Airbagauslösung. Es sei möglich, „... Ultraschallsensoren rund um das Fahrzeug anzubringen, die den Kontakt mit einem Gegenstand sensieren und die zusätzlich zu den bereits bestehenden Sensoren vor der Auslösung der Airbags abgefragt würden...“ [4].

Dieses Beweissicherungsgutachten ist jedoch aus technischer Sicht mehr als fragwürdig, denn aktuelle Sensorausführungen ermöglichen in Serienfahrzeugen nur eine Reichweite von wenigen Metern. Daher ist nach dem heutigen Stand der Technik eine Anwendung der Ultraschallsensorik auf die Erfassung statischer Umgebungen bei langsamer Fahrt im Bereich der Einparkassistenten beschränkt. Die hochfrequenten Schallwellen der Sensoren können durch andere Ultraschallquellen wie Druckluftbremsen von Lkw und Bussen oder Pressluftschlämmern gestört werden und zu Fehldetektionen führen. Ebenso erfolgt bei schlecht reflektierenden Oberflächen keine Reflektion. Damit bleibt eine Erkennung von Gegenständen gänzlich aus [11]. Außerdem stellte sich in dem Verfahren letztendlich heraus, dass das betroffene Sensorsystem entsprechend der technischen Spezifikation fehlerfrei gearbeitet hat.

Auch fordert das vorangehende Grundsatzurteil des BGH, Risiken und Nutzen vor einer Markteinführung zu prüfen:

Erforderlich sind die Sicherungsmaßnahmen, die nach dem im Zeitpunkt des Inverkehrbringens des Produkts vorhandenen neuesten Stand der Wissenschaft und Technik konstruktiv möglich sind ... und als geeignet und genügend erscheinen, um Schäden zu verhindern. [4] Sind bestimmte mit der Produktnutzung einhergehende Risiken nach dem maßgeblichen Stand von Wissenschaft und Technik nicht zu vermeiden, ist unter Abwägung der Risiken, der Wahrscheinlichkeit ihrer Verwirklichung und des mit dem Produkt verbundenen Nutzens zu prüfen, ob das gefährliche Produkt überhaupt in den Verkehr gebracht werden darf. [4]

28.3.1 Allgemein anerkannte Regeln der Technik (aaRdT)

Eine Auslegung des Rechtsbegriffs „allgemein anerkannte Regeln der Technik (aaRdT)“ als Grundlagenregel prägte ein Urteil des Reichsgerichts (RGSt 44, 86) von 1910 auf Basis einer Entscheidung aus dem Jahr 1891 in einem Strafverfahren zu § 330 StGB im Zusammenhang mit dem Baurecht:

Als allgemein anerkannte Regeln der Technik sind solche anzusprechen, die sich aus der Summe aller Erfahrungen im technischen Bereich ergeben, deren Bewährung in der Praxis feststeht und von deren Richtigkeit die Fachleute überzeugt sind.

In verschiedenen Rechtsbereichen haben sie unterschiedliche Bedeutungen. Bei den allgemein anerkannten Regeln der Technik handelt es sich bezogen auf die Produkthaftung um Mindestanforderungen, deren Nichteinhaltung dafür spricht, dass die erforderliche Sicherheit nicht erreicht wurde. Sie sind u. a. in DIN-VDE-Bestimmungen, DIN-Normen, Unfallverhütungsvorschriften und VDI-Richtlinien beschrieben [12].

28.3.2 Produktsicherheitsgesetz (ProdSG)

Das Produktsicherheitsgesetz (ProdSG) in der Neufassung vom 08.11.2011 stellt Regeln zu Sicherheitsanforderungen und Verbraucherprodukten auf. Sein Vorläufer war das Geräte- und Produktsicherheitsgesetz vom 01.05.2004, das wiederum das Produktsicherheitsgesetz (ProdSG) vom 22.04.1997 und das Gerätesicherheitsgesetz (GSG) vom 24.06.1968 abgelöst hatte. Der § 3 beschreibt allgemeine Anforderungen an die Bereitstellung von Produkten auf dem Markt:

Ein Produkt darf ... nur auf dem Markt bereitgestellt werden, wenn es bei bestimmungsgemäßer oder vorhersehbarer Verwendung die Sicherheit und Gesundheit von Personen nicht gefährdet. [13]

28.3.3 Produkthaftungsgesetz (ProdHaftG)

Unabhängig von der rechtlichen Anspruchsgrundlage bezeichnet der Begriff „Produkthaftung“ die gesetzliche Haftung des Herstellers für Schäden aus einem fehlerhaften Produkt. Hersteller ist, wer ein Endprodukt, ein Teilprodukt, einen Grundstoff herstellt oder seinen Namen bzw. seine Marke am Produkt anbringt. In Deutschland bestehen für die Produkthaftung zwei unterschiedliche Anspruchsgrundlagen: Die verschuldensabhängige Haftung nach § 823 des Bürgerlichen Gesetzbuchs (BGB) [13] und zum anderen die verschuldensunabhängige Haftung nach dem Produkthaftungsgesetz. So beschreibt das Produkthaftungsgesetz (ProdHaftG – Gesetz über die Haftung für fehlerhafte Produkte) vom 15.12.1989 die Konsequenzen eines Fehlers in § 1:

Wird durch den Fehler eines Produkts jemand getötet, sein Körper oder seine Gesundheit verletzt oder eine Sache beschädigt, so ist der Hersteller des Produkts verpflichtet, dem Geschädigten den daraus entstehenden Schaden zu ersetzen. [14]

Unabhängig davon, ob der Produktfehler vorsätzlich oder fahrlässig herbeigeführt wird, definiert das ProdHaftG einen Fehler gemäß § 3 Abs. 1 wie folgt:

Ein Produkt hat einen Fehler, wenn es nicht die Sicherheit bietet, die unter Berücksichtigung aller Umstände, insbesondere seiner Darbietung, des Gebrauchs, mit dem billigerweise gerechnet werden kann, sowie des Zeitpunkts, in dem es in den Verkehr gebracht wurde, berechtigterweise erwartet werden kann. [14]

Falls durch ein fehlerhaftes Produkt Schäden entstehen, regelt das Produkthaftungsgesetz die Haftung des Herstellers. Zunächst zieht dies mögliche Ansprüche aus der zivilrechtlichen Haftung für Sachschäden, Vermögensschäden, Personenschäden oder Schmerzensgeld nach sich. Haftpflichtig ist primär der Hersteller. In begründeten Fällen können auch Zulieferer, Importeure, Vertriebshändler oder Verkäufer unbegrenzt haftbar gemacht werden. Darüber hinaus können bei einer begründeten strafrechtlichen Haftung speziell auch Konsequenzen für die Unternehmensleitung oder einzelne Mitarbeiter entstehen, wenn nachweisbar versäumt wurde, Risiken auf ein akzeptiertes Maß zu reduzieren (S. 624, Abb. 28.3). Im Fall von grobem Verschulden bzw. je nach Delikt auch bei Fahrlässigkeit kann dies unter Umständen für einen Entwickler persönlich strafrechtliche Konsequenzen nach sich ziehen.

Neben den rechtlichen Folgen müssen Hersteller auch mit erheblichen negativen wirtschaftlichen Konsequenzen rechnen. Negative Schlagzeilen in den Medien können zu beträchtlichen Umsatz- bzw. Gewinneinbußen, Imageverlust und in der weiteren Folge zum Verlust von Marktanteilen führen. So sind bei der Entwicklung neuer Systeme die Risiken rechtlicher wie auch wirtschaftlicher Folgen zu bedenken. Abbildung 28.2 gibt einen Überblick über mögliche Auswirkungen von Fehlern automatisierter Fahrzeuge.



Abb. 28.2 Mögliche Auswirkungen bei Fehlern automatisierter Fahrzeuge

28.4 Erhöhung der Produktsicherheit automatisierter Fahrzeuge auf der Basis von Expertenerfahrungen aus Haftungs- und Gewährleistungsansprüchen

28.4.1 Erfahrungen aus Produktkrisen

Sichere automatisierte Fahrzeuge werden zukünftig weiterhin von integrierten Qualitätsmanagementsystemen [15, 16] und sicheren Interaktionen [17] abhängig sein. Oft waren in der Vergangenheit insbesondere fortschrittliche und erfolgreiche Fahrzeuge von Produktkrisen betroffen.

28.4.1.1 Fehlerhafte Zulieferteile

Folgende Beispiele dokumentieren, wie Teile eines Zulieferers Auslöser für weitreichende Produktkrisen geworden sind.

Der Ford Explorer galt als weltweit meistverkauftes Sport Utility Vehicle. Im Mai 2000 kontaktierte die NHTSA in den USA die beiden Konzerne Ford und Firestone wegen eines auffällig häufigen Auftretens von Reifenschäden durch die Ablösung von Laufflächen. Betroffen waren der Ford Explorer, Mercury Mountaineer und Mazda Navajo. Alle waren werkseitig mit Firestone-Reifen ausgestattet. Nach Reifenschäden kam es bei höheren Geschwindigkeiten zu Schleuderunfällen mit Überschlägen und tödlichem Ausgang. So standen Firestone-Reifen auf Ford-Explorer-Fahrzeugen im Zusammenhang mit über 200 tödlich verletzten Personen in den USA und mehr als 60 Toten in Venezuela. Im gerichtlichen Vergleich bezahlten Ford und Firestone 7,85 Millionen Dollar. Insgesamt betragen die Schadenersatz- und Strafzahlungen 369 Millionen Dollar. Zum teuren Rückruf von mehreren Millionen Reifen wurden zusätzlich im Anschluss Fehler in der Krisenkommunikation begangen: Die verantwortlichen Manager schoben sich gegenseitig öffentlich die

Schuld zu. So zerbrach die über 100 Jahre alte freundschaftliche Geschäftsbeziehung der beiden Unternehmen. Bereits 1895 hatte Harvey Firestone Reifen an Henry Ford für die Produktion seines ersten Automobils verkauft. Im weiteren Verlauf der Krise kam es zu eklatanten Imageschäden mit Einbrüchen der Verkaufszahlen für beide Parteien [18].

Einen weiteren Beispielfall für mangelhafte Zulieferteile gab General Motors (GM) im Februar 2014 bekannt. Durch die Folgen der Wirtschaftskrise 2009 stand der Automobilkonzern kurz vor der Insolvenz und hatte nach einer staatlichen Rettungsaktion erstmals wieder Gewinne ausgewiesen sowie Preise für neue Modelle erhalten. Doch der Schalter des Zündschlosses einiger Modelle war scheinbar seit 2001 zu schwach ausgelegt, weshalb der Zündschlüssel während der Fahrt in die Position „Aus“ zurückspringen konnte. In diesem Fall schalten sich Motor, Bremskraftverstärker, Servolenkung und die Airbags ab. Die GM-Ingenieure waren mit dem Vorwurf konfrontiert, den Sicherheitsmangel trotz früher Warnzeichen mehr als zehn Jahre lang ignoriert zu haben. Der Konzern wurde deshalb bereits wegen eines verschleppten Rückrufs zu einer Geldstrafe von 35 Millionen Dollar verurteilt und sieht sich nach Massentrückrufen über Jahre mit milliardenschweren Schadenersatzklagen von Unfallopfern und Fahrzeugbesitzern konfrontiert [19].

28.4.1.2 Angeblich selbstbeschleunigende Fahrzeuge

Fahrzeuge mit automatisiertem Eingriff in die Längs- und Querführung bergen erhebliche Risiken und eine Angriffsfläche für die Behauptung, es sei unerwünschtes Lenk- oder Beschleunigungs- bzw. Verzögerungsverhalten aufgetreten. Mit dem Vorwurf der ungewollten Beschleunigung (*unintended acceleration*) durch angebliche technische Mängel standen in der Vergangenheit bereits einige Automobilhersteller im Kreuzfeuer der Medien. Vor allem in den USA hätten Fahrzeuge selbstständig beschleunigt und dadurch tödliche Unfälle verursacht. Betroffene Fahrer lösten deshalb Klagewellen aus, die seit Jahrzehnten andauern.

Ein Beispiel hierfür waren die Vorwürfe gegen Toyota, einem weltweit erfolgreichen und für Qualität bekannten Konzern. Toyota schnitt bei einer Kundenzufriedenheitsstudie des amerikanischen Marktforschungsunternehmens J.D. Power and Associates in den Jahren 2002, 2004 und 2005 sehr gut ab. Doch 2009 war Toyota mit Vorwürfen wegen angeblich selbstbeschleunigender Fahrzeuge konfrontiert. Auslöser waren zunächst einzelne Vorfälle von verrutschten Fußmatten, die für ein Verklemmen des Gaspedals verantwortlich gewesen sein sollen. Dann wurde behauptet, die Fahrzeuge hätten wegen mechanisch klemmender Gaspedale während der Fahrt unerwünscht beschleunigt. Da Toyota aus Sicht der NHTSA nicht ausreichend schnell auf die Vorwürfe reagiert hatte, warf man dem Unternehmen eine Verschleierung von Sicherheitsproblemen im Zusammenhang mit mehr als 50 Todesfällen in den USA vor. Neben den Zahlungen zum Schadensausgleich musste Toyota 2010 eine außergewöhnlich hohe Geldbuße von 16,4 Millionen Dollar an die Behörde bezahlen. Daraufhin folgten weitreichende Rückrufaktionen und Schadenersatzklagen [20].

Ein weiteres Beispiel für einen nachgewiesenen technischen Fehler, der zu unerwünschten Beschleunigungen führte, zeigt eine Rückrufaktion der NHTSA vom Juni 2014. Die Adaptive Cruise Control von Geländefahrzeugen der Firma Chrysler reduzierte die Geschwindigkeit nach einem vorübergehenden Übertreten nicht wieder auf die gesetzte Geschwindigkeit,

sondern beschleunigte unerwünscht weiter. Unfallopfer waren keine zu beklagen. Die kurzfristig eingeleitete Rückrufaktion beschränkte sich auf 6082 Fahrzeuge [21].

28.4.2 Wesentliche Fragen aus bisherigen Produkthaftungsfällen

Eigene Erfahrungen des Verfassers aus bisherigen Produkthaftungsfällen haben gezeigt, dass eine strukturierte Entwicklung als Mindestanforderung insbesondere auch für ein sicheres automatisiertes Fahrzeug vorausgesetzt wird (S. 627, Abschnitt 28.4.6). Im Schadensfall sind die im Folgenden genannten Fragen zur Abwehr zivil- und strafrechtlicher Ansprüche von Bedeutung:

- Wurde bereits vor Beginn einer neuen Produktentwicklung unter Abwägung der Risiken, der Eintrittswahrscheinlichkeit und des Nutzens geprüft, ob das Fahrzeug mit dieser technischen Umsetzung überhaupt in den Verkehr gebracht werden darf?

Grundsätzlich existieren neben den allgemeinen gesetzlichen Anforderungen bis heute keine abgestimmten und harmonisierten Methoden für vollautomatisierte Fahrzeuge. Generieren lassen sich diese durch international anerkannte Entwicklungsleitfäden mit Checklisten – ähnlich dem mit der ISO 26262 [22] (Teil 3, Concept phase, Seite 24, Controllability) verlinkten RESPONSE 3-ADAS Code of Practice für die Entwicklung und Validierung von Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) mit aktiver Längs- und Querführung [5]:

- Welche Maßnahmen wurden zur Risiko-, Schadens- und Gefahrenminimierung über den gesetzlichen Rahmen hinaus ergriffen?

Zukünftige Vorgaben werden sich an den heute gültigen Anforderungen orientieren und diese zum größten Teil übernehmen. Die Methoden zur Bewertung des Risikos während der Entwicklung (S. 623, Abschnitt 28.4.4) gewährleisten, dass bei der Nutzung des Fahrzeugs keine intolerablen Personengefährdungen zu erwarten sind. Deshalb sind bei der Entwicklung mindestens die heute allgemein gültigen Anforderungen, Richtlinien, Verfahren und Prozesse zu berücksichtigen:

- Wurden beispielsweise allgemein anerkannte Regeln, Normen oder technische Vorschriften eingehalten?

Die Einhaltung gängiger Vorgaben allein ist im Allgemeinen nicht ausreichend. Vielmehr werfen sie folgende Fragen auf:

- Wurde mit der geforderten Sorgfalt entwickelt, produziert und vertrieben?
- Hätte der entstandene Schaden mit einer anderen Konstruktion vermieden oder in seiner Auswirkung gemindert werden können?
- Wie verhält sich bzw. wie hätte sich ein Fahrzeug aus dem Wettbewerb verhalten?
- Hätten Warnungen den Schaden verhindern können?

Ob ein automatisiertes Fahrzeug die erforderliche Sicherheit erreicht hat, zeigt sich am Ende des Entwicklungsprozesses:

- Wurde eine angemessene Sicherheit durch geeignete und genügende Maßnahmen nach dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik bei Inverkehrbringen erreicht?

Auch nach einer erfolgreichen Markteinführung ist eine Beobachtung im Serieneinsatz zwingend erforderlich. Selbst dann, wenn alle rechtlichen Anforderungen, Richtlinien und Qualitätsprozesse für einen sicheren Gebrauch der entwickelten automatisierten Funktionen und für mögliche Fehlfunktionen eingehalten wurden. Die Beobachtungspflicht ergibt sich aus der Verkehrssicherungspflicht im Rahmen von § 823 Abs. 1 Bürgerliches Gesetzbuch (BGB) [13], deren Verletzung eine Haftung für einen Fehler auslöst, der solchermaßen hätte erkannt werden müssen. So stellt sich bei Produkthaftungsfällen auch die abschließende Frage:

- Wird bzw. wurde das automatisierte Fahrzeug im Kundenbetrieb beobachtet?

28.4.3 Potenzielle Gefahrensituationen zu Beginn der Entwicklung

Alltagserfahrungen unserer technologisch fortgeschrittenen Gesellschaft zeigen: Risiken und gefahrenträchtige Handlungen gehören zwangsläufig zum Leben. Unsicherheit und Unwägbarkeiten werden nicht mehr als schicksalhaft hinzunehmende Ereignisse betrachtet, sondern als mehr oder weniger kalkulierbare Unsicherheiten [23]. Daraus ergeben sich höhere Ansprüche an das Risikomanagement für die Hersteller neuer Technologien.

Eine strukturierte Analyse der Gefahren unter Berücksichtigung aller möglichen Umstände kann helfen, einen ersten Gesamtüberblick über die potenziellen Gefahren zu erhalten. Deshalb ist es im frühen Entwicklungsstadium sinnvoll, eine vollständige Beschreibung des automatisierten Fahrzeugs zu geben, um eine logische Gefahrenanalyse und eine anschließende Risikoklassifizierung zu gewährleisten (s. Abschnitt 28.4.4).

Auf dieser Basis ist es möglich, zum Projektstart in einem interdisziplinären Expertenteam (S. 627, Abb. 28.4) gemeinsam eine vollständige Liste der potenziell gefährlichen Situationen zu erstellen. Dies führt in der Regel zu vielen relevanten Situationen. Aufgrund praktischer Erwägungen sollten die Szenarien später für eine Expertenbewertung und Testung auf jene Situationen beschränkt werden, welche die höchste Relevanz besitzen (z. B. relevante Szenarien aus der Verknüpfung verfügbarer Verkehrsunfall-, Wetterdaten und Verkehrssimulationen, s. Kap. 17).

Nach der Systemdefinition ist es empfehlenswert, zunächst Situationen in einer Liste oder Tabelle zu sammeln. Diese berücksichtigt:

- wann die Funktion der Automatisierung verlässlich gewährleistet sein sollte (normale Funktion)

- in welchen Situationen die Automatisierung verwendet werden könnte, wofür sie jedoch nicht ausgelegt ist (Falschinterpretation und potenzieller Fehlgebrauch)
- wann Leistungsgrenzen für erforderliche Redundanzen erreicht sind
- ob gefährliche Situationen durch Fehlfunktionen der Automatisierung verursacht werden (Versagen)

Die gemeinsame Erarbeitung einer maximalen Anzahl an systemrelevanten Situationen macht es wahrscheinlich, dass keine relevante Gefahr ausgelassen oder vergessen wurde. Im nächsten Schritt empfiehlt sich eine Zusammenfassung von Gefahren mit direktem Einfluss auf die Sicherheit. Nach einer Reduktion auf tatsächliche sicherheitsrelevante Situationen werden hierfür technische Lösungen entwickelt.

28.4.4 Methoden zur Risikobewertung während der Entwicklung

In einer Veröffentlichung der Bundesregierung wird im Zusammenhang mit dem Ausstieg aus der Atomenergie erwähnt, dass die deutsche Gesellschaft als „Schicksalsgemeinschaft“ und als Teil der „Weltrisikogesellschaft“ den Fortschritt und Wohlstand bei gleichzeitig beherrschbaren Risiken wünscht [24]. Dies ist sicherlich nur eingeschränkt auf den Straßenverkehr übertragbar, denn die Risiken durch automatisierte Fahrzeuge beschränken sich – im Gegensatz zur Atomenergie – auf einen überschaubaren Personenkreis. Ähnlich sind jedoch spezifische Anforderungen an die verwendeten Methoden zur Analyse und Bewertung der Risiken. Im Folgenden werden fünf gängige Methoden vorgestellt.

28.4.4.1 Gefahrenanalyse und Risikobewertung

Der ADAS Code of Practice zur Entwicklung aktiver Längs- und Querführungsfunktionen [5, 6] sowie die ISO 26262 Teil 3 zur Funktionssicherheit [22] beschreiben das Vorgehen zur Gefahrenanalyse und Risikobewertung (G&R). Auch Teile der in den folgenden Abschnitten genannten Methoden (HAZOP, FMEA, FTA, HIL) verweisen auf die G&R. Ziel der G&R ist es, potenzielle Gefahren einer Betrachtungseinheit zu identifizieren, einzustufen und Ziele zu definieren. So lassen sich Gefahren vermeiden und die Risiken auf ein gesellschaftlich und individuell akzeptiertes Maß minimieren. Dazu wird eine „Betrachtungseinheit“ bezüglich ihres Einflusses auf die Sicherheit beurteilt und einem Automotive Safety Integrity Level (ASIL) zugeordnet. Eine „Betrachtungseinheit“ (Item) nach ISO 26262 ist definiert als komplexes elektrisches/elektronisches System oder als Funktion, die mechanische Komponenten verschiedener Technologien enthalten kann. Der ASIL wird bestimmt durch eine systematische Auswertung von möglicherweise gefährlichen Situationen und Betriebsbedingungen. Dabei erfolgt eine Bewertung der Unfallschwere [25] im Zusammenhang mit der Auftrittswahrscheinlichkeit. Eine Reduktion auf eine angenommene Hardwareausfall-Fehlerrate (z.B. ASIL D: $< 10^{-8} \text{ h}^{-1}$) für gesellschaftlich und individuell akzeptierte Risiken (S. 624, Abb. 28.3) erfolgt durch externe Maßnahmen [22].

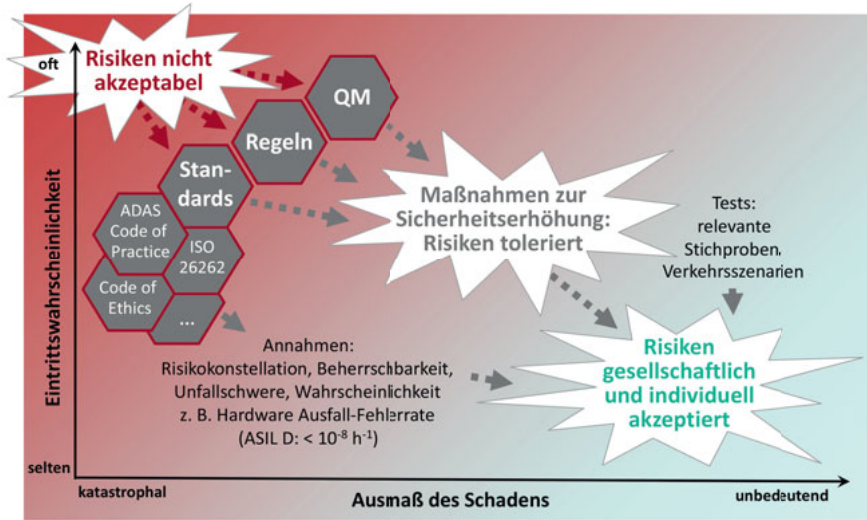


Abb. 28.3 Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit auf gesellschaftlich und individuell akzeptierte Risiken

Grundlegend kann das Risiko R für einen analytischen Ansatz ausgedrückt werden als Funktion F der Frequenz f , mit der ein gefahrbringendes Ereignis auftritt, und der potenziellen Schadensschwere S des sich daraus ergebenden Schadens:

$$R = F(f, S) \quad (28.1)$$

Die Frequenz f , mit der ein gefahrbringendes Ereignis auftritt, wird wiederum von verschiedenen Parametern beeinflusst. Ein wesentlicher zu berücksichtigender Faktor ist, wie häufig oder wie lange sich eine Person in einer Situation aufhält, in der eine Gefahr auftreten kann ($E = \text{exposure}$). Ein anderer Faktor, der das Auftreten eines gefahrbringenden Ereignisses beeinflusst, ist die Vermeidung einer potenziellen Schadensauswirkung durch rechtzeitige Reaktionen der am Unfallgeschehen beteiligten Personen bzw. Verkehrsteilnehmer ($C = \text{controllability}$). Eine Beherrschbarkeit durch den Fahrer entfällt jedoch in Bezug auf das unfallbeteiligte fahrerlose bzw. vollautomatisierte Fahrzeug. Das Produkt $E \times C$ ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, dass in einer gewissen Situation ein Fehler das Potenzial hat, sich entsprechend dem beschriebenen Schaden auszuwirken.

Ein weiterer Faktor ($\lambda = \text{Fehlerrate}$) lässt sich zurückführen auf unentdeckte zufällige Hardwareausfälle der Systemkomponenten und auf gefährliche systematische Fehler, die im System verblieben sind. Er stellt die Häufigkeit des Auftretens bezogen auf E dar, mit der das automatisierte Fahrzeug selbst ein gefahrbringendes Ereignis auslösen kann. Somit beschreibt das Produkt f die Anzahl der Ereignisse, die während der Zeit E (z. B. gefahrene Kilometer oder Anzahl der Fahrzeugstarts) zu erwarten sind.

$$f = E \times \lambda \quad (28.2)$$

Weiterhin berücksichtigt die ISO 26262 Ausfallraten technischer und elektronischer Bauteile (Failure in Time – FIT). Die Einheit FIT gibt die Anzahl der Bauteile an, die innerhalb von 10^9 Stunden ausfallen. Im Ergebnis aus Auftrittswahrscheinlichkeit f und – falls möglich – Beherrschbarkeit bzw. Kontrollierbarkeit C erfolgt eine Einstufung der „Sicherheitskritikalität“ nach ASIL B, C (empfohlene Ausfallwahrscheinlichkeit kleiner 10^{-7} je Stunde; dies entspricht einer Rate von 100 FIT) bis ASIL D (geforderte Ausfallwahrscheinlichkeit kleiner 10^{-8} je Stunde; dies entspricht einer Rate von 10 FIT). Die höchsten Anforderungen entsprechen dem ASIL D. Zusätzlich berücksichtigt die ISO 26262 neben dem normalen Betrieb des Fahrzeugs auch Serviceanforderungen bis hin zur Stilllegung des Fahrzeugs. In diesem Zusammenhang müssen Entwickler bei der Auswahl von Bauelementen Alterungsfolgen elektronischer Systeme in Betracht ziehen. Steuergeräte oder Sensoren sind durch eine robuste Auslegung entsprechend zu schützen, falls sie mit alterungsempfindlichen Elektrolytkondensatoren zur Energiereserve bestückt wurden. Ein Ausfall darf keine wichtigen Funktionen außer Kraft setzen [22].

28.4.4.2 Gefahren- und Operabilitätsstudie (HAZOP)

Die Gefahren- und Operabilitätsstudie (Hazard and Operability Study – HAZOP) ist eine frühe Risikobewertung, die in der Prozessindustrie entwickelt wurde. Eine HAZOP sucht nach jeder vorstellbaren Prozessabweichung vom normalen Betrieb und betrachtet dann mögliche Ursachen und Konsequenzen. Typischerweise führt ein Spezialistenteam aus den betroffenen Entwicklungsbereichen die Suche bei der HAZOP systematisch durch, um so die Wahrscheinlichkeit zu minimieren, dass wichtige Faktoren übersehen werden [5].

28.4.4.3 Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse (FMEA)

Die Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse (Failure Mode and Effects Analysis – FMEA) sowie die integrierte Fehler-Möglichkeiten-, Einfluss- und Kritikalitätsanalyse (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis – FMECA) sind Methoden zur Zuverlässigkeitsanalyse, die Fehler mit signifikanten Konsequenzen identifizieren, welche die Systemleistung in der betrachteten Anwendung betreffen. Die FMEA basiert auf einem definierten System, einer Baugruppe oder einem Bauteil, für das die grundlegenden Fehlerkriterien (Primärfehlermodi) verfügbar sind. Sie ist eine Technik zur Absicherung und Einschätzung möglicher Fehlerzustände bei der Auslegungsüberprüfung. Sie kann vom ersten Schritt der Systemauslegung bis zum fertigen Produkt angewendet werden. Die FMEA lässt sich auf die Auslegung aller Systemebenen anwenden [26, 27].

28.4.4.4 Fehlerbaumanalyse (FTA)

Die Fehlerbaumanalyse (Fault Tree Analysis – FTA) beschäftigt sich mit der Identifikation sowie Analyse von Bedingungen und Faktoren, die das Auftreten eines definierten Fehlerzustands begünstigen, der die Systemleistung, Wirtschaftlichkeit, Sicherheit oder andere erforderliche Eigenschaften beträchtlich beeinflusst. Der Fehlerbaum ist besonders geeignet für die Analyse komplexer Systeme, die mehrere funktionell zusammenhängende oder unabhängige Untersysteme mit verschiedenen Leistungszielen umfassen. Dies trifft insbe-

sondere auf Systemauslegungen zu, die eine Zusammenarbeit zwischen vielen spezialisierten technischen Designgruppen erfordern. Beispiele von Systemen, bei denen die Fehlerbaumanalyse verbreitet angewendet wird, sind Kernkraftwerke, Flugzeuge, Kommunikationssysteme, chemische und andere industrielle Prozesse. Der Fehlerbaum selbst ist eine organisierte grafische Darstellung der Bedingungen oder anderer Faktoren, die das Eintreten eines definierten unerwünschten Vorfalles, den man auch *Top Event* nennt, verursachen oder dazu beitragen [5].

28.4.4.5 Hardware-in-the-Loop (HIL)-Tests

Eine zunehmende Fahrzeugvernetzung stellt besondere Anforderungen an die Absicherung des gesamten Steuergeräteverbands, z. B. von Bordnetzicherheit, Buskommunikation, Fahrzeugzustandsmanagement, Diagnose und Flashverhalten. Hardware-in-the-Loop (HIL)-Tests lassen sich anwenden, sobald ein Hardware-Prototyp des Systems oder auch ein Teil davon (z. B. eine elektronische Steuereinheit eines Fahrzeugs) verfügbar ist. In einer software-simulierten, virtuellen Umgebung wird der Prototyp als Device Under Test (DUT) in einen „Loop“ (Kreislauf) eingefügt. Diese soll der echten Umgebung so ähnlich wie möglich sein. Der DUT wird unter Echtzeitbedingungen betrieben [28].

28.4.5 Prüfkriterien durch Expertenwissen

Im Freigabeprozess ist eine Vorgehensweise zur Überprüfung vorzusehen. Für den Endnachweis einer Sicherheitsbestätigung automatisierter Fahrzeuge sind Prüfkriterien im Sinne von „bestanden“ bzw. „nicht bestanden“ zu empfehlen. Unabhängig davon, welche Methoden für den abschließenden Freigabenachweis ausgewählt wurden, sollten sich die Experten darauf einigen, welche Prüfkriterien ausreichend sind, damit das Fahrzeug bestimmte Situationen eines Systemversagens oder Fehlfunktionen erfolgreich bewältigt. Für entsprechende Kriterien sind allgemein anerkannte Werte zum Erreichen der gewünschten Fahrzeugreaktion heranzuziehen. Eine Evaluation kann durch etablierte Methoden erfolgen.

Auf Basis der Liste potenzieller Gefahrensituationen (S. 622, Abschnitt 28.4.3) entwickelt ein Expertengremium die Prüfkriterien für sicheres Fahrzeugverhalten und eventuell auch relevante Testszenarien. Dafür ist insbesondere ein Team von Systemingenieuren und Unfallforschern erforderlich. Die erste Gruppe bietet Wissen über die genauen Systemfunktionalitäten, Zeitabläufe und Erfahrungen mit Fehlermöglichkeiten. Unfallforscher tragen ihr Erfahrungswissen über risikobehaftete Verkehrssituationen bei (s. Kap. 17). Jede bekannte risikobehaftete Situation, in die das Fahrzeug geraten könnte, ist zu berücksichtigen. Zu den identifizierten Risiken spezifiziert der Entwickler mindestens eine mögliche Abhilfemaßnahme im Hinblick auf die Sicherheitsanforderungen. Bezogen auf den abschließenden Nachweis gilt das Testszenario als „bestanden“, wenn das automatische Fahrzeug wie erwartet reagiert oder die Situation anderweitig zufriedenstellend löst.

28.4.6 Schritte zur Erhöhung der Produktsicherheit automatisierter Fahrzeuge im allgemeinen Entwicklungsprozess

Für die Gewährleistung der Produktsicherheit automatisierter Fahrzeuge ist ein sorgfältiges Entwicklungskonzept notwendig, welches sich mindestens am aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik orientiert. Hierfür wird nachfolgend ein allgemeiner Entwicklungsprozess vorgeschlagen, wie ihn heute vom Grundsatz her mit kleinen Anpassungen die Automobilhersteller für die Entwicklung von Serienfahrzeugen anwenden. Dieser als V-Modell dargestellte generische Entwicklungsprozess (s. Abb. 28.4) bildet eine logische Abfolge der Phasen einer Produktentwicklung und ausgewählte Meilensteine, jedoch nicht zwingend deren Zeitablauf ab [5, 29].

Der Prozess ist eine vereinfachte Darstellung in Form eines V-Modells, das Iterations-schleifen innerhalb der individuellen Entwicklungsphasen gemeinsam mit allen Beteiligten ermöglicht. Innerhalb dieser V-förmigen Prozessstrukturierung (s. Abb. 28.4) sind Elemente des Sicherheitsprozesses berücksichtigt. Auch empfiehlt sich frühzeitig und regelmäßig interdisziplinäre Expertengruppen zu berücksichtigen. Von der Definitionsphase bis zur Absicherung, Abnahme und dem Produktionsstart sollten Experten aus Forschung, (Vor-) Entwicklung, Funktionssicherheit, Produktanalyse, Rechtswesen, Verkehrssicherheit, Technikethik, Ergonomie, Produktion und Vertrieb einbezogen werden.

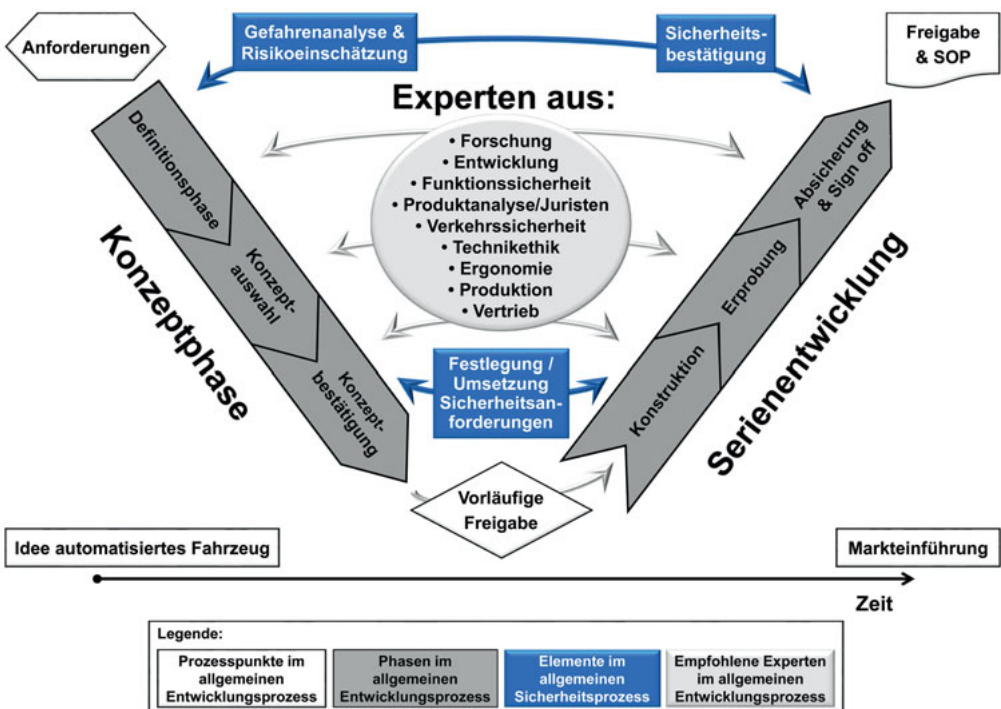


Abb. 28.4 Allgemeiner Entwicklungsprozess für automatisierte Fahrzeuge von der Idee bis zur Markteinführung unter Einbeziehung empfohlener Experten

Bei den Entwicklungsschritten zur Erhöhung der Produktsicherheit automatischer Fahrzeuge steht die Funktionssicherheit als Schlüsselanforderung im Vordergrund. Sie bezieht sich auf die gesamte Interaktion zwischen dem Fahrzeug und der Umgebung. Eine Interaktion mit dem Fahrer [30] ist dann zu berücksichtigen, wenn hierfür entsprechend dem Anwendungsfall bzw. der Funktionalität eine Schnittstelle vorgesehen ist. Vollautomatische Fahrzeuge schließen im Wesentlichen die fünf folgenden Nutzungssituationen für die Betrachtung der Produktsicherheit ein. Im Vordergrund steht die funktionale Sicherheit des vollautomatischen Fahrzeugs – innerhalb sowie an den Leistungsgrenzen und auch jenseits davon. Weiterhin ist die Funktionssicherheit während und nach Systemausfällen zu betrachten. Eine sorgfältige Entwicklung anwendungssicherer fahrerloser Fahrzeuge muss sicherstellen, dass diese die Kritikalität einer Situation erkennen, über geeignete Maßnahmen zur Gefahrenabwehr (z.B. Degradation, Fahrmanöver) mit einer Rückführung in einen sicheren Zustand entscheiden und diese Maßnahmen schließlich durchführen.

Einen Überblick über einen möglichen Arbeitsfluss im Hinblick auf die Freigabe bis hin zur Stilllegung gibt Abb. 28.5. Am Ende der Entwicklung eines automatisierten Fahrzeugs entscheidet das Entwicklungsteam, ob noch ein abschließender Bestätigungstest erforderlich ist. Dieser bestätigt, dass der Serienstand eine ausreichende Sicherheit erreicht. Hierzu verifiziert das Entwicklungsteam, dass ein Fahrzeug in relevanten Szenarien so wie vorher eingeschätzt oder in einer anderen situativ angemessenen Weise reagiert. Die hierfür verwendeten Daten können aus Methoden zur Bewertung des Risikos während

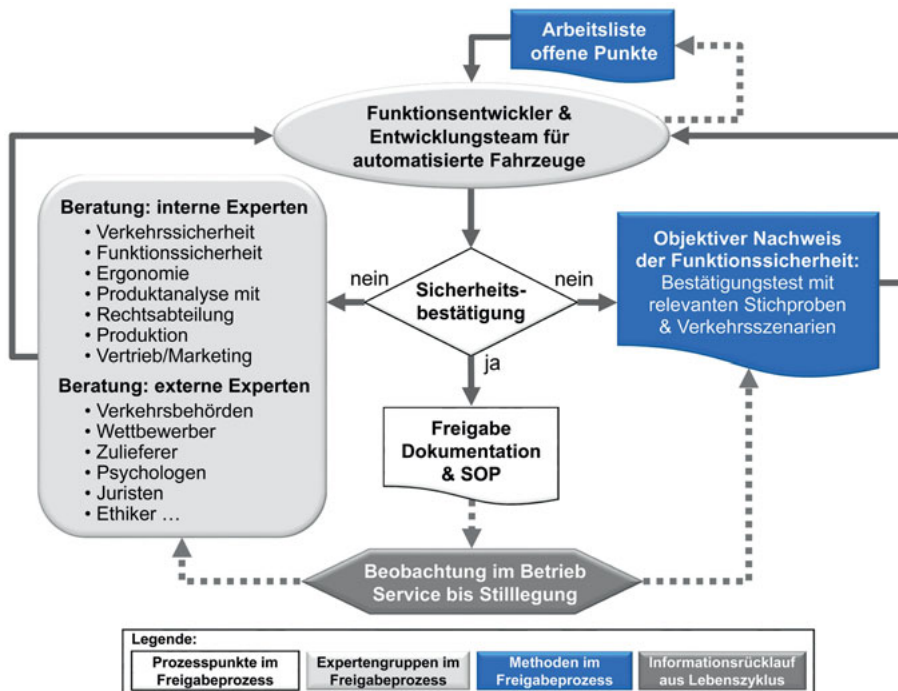


Abb. 28.5 Empfohlener Freigabeprozess für automatisierte Fahrzeuge

der Entwicklung stammen (z.B. Gefahren- und Risikoanalyse). Drei gleichwertige Freigabewege sind möglich. Eine direkte Freigabe erfolgt durch die erfahrungsbasierte Empfehlung des Entwicklungsteams. Weiterhin kann eine abschließende Sicherheitsbestätigung nach entsprechender Rückversicherung über ein internes bzw. externes interdisziplinäres Expertenforum oder einen objektiven Nachweis verabschiedet werden. Die Bestätigung der Funktionssicherheit ist mittels Bestätigungstests basierend auf relevanten Verkehrsszenarien (s. Kap. 17) und anderen objektiven Stichproben möglich (s. Abb. 28.5).

Das Entwicklungsteam wählt für jedes einzelne Szenario einen geeigneten Weg aus. Ein gemischter Ansatz ist ebenfalls möglich. Wenn das Entwicklungsteam die Sicherheitsbestätigung der Systemauslegung abschließend veranlasst, kann die endgültige Freigabe erteilt werden (vgl. [5]).

28.4.7 Produktbeobachtung nach der Markteinführung

Im Anschluss an eine sorgfältige Entwicklung ist ein Hersteller verpflichtet, ein automatisiertes Fahrzeug nach dem sogenannten Inverkehrbringen zu beobachten, um bislang unbekannte Gefahren zu erkennen und nachträglich geeignete Sicherheitsmaßnahmen zu ergreifen. Danach ist ein Automobilhersteller angehalten, mögliche Gefahren zu erkennen (die auch bei nicht bestimmungsgemäßer oder missbräuchlicher Verwendung auftreten können), um mit entsprechenden Maßnahmen wie beispielsweise Rückrufaktionen, Nachbesserung oder Benutzerinformationen zu reagieren.

Als spezielles Beispiel zur Produktbeobachtungspflicht bei Kombinationsrisiken mit Drittzubehör wird unter Produkthaftungsexperten oft ein Urteil des Bundesgerichtshofs (BGH) zitiert. Modellspezifische Motorrad-Lenkerverkleidungen aus dem Zubehör, die amtlich anerkannte Sachverständige einer Prüforganisation im Juni 1977 erstmalig abgenommen hatten, sollen für drei spektakuläre Unfälle verantwortlich gewesen sein, darunter ein tödlicher. Der betroffene Motorradhersteller schrieb am Tag vor dem tödlichen Unfall jeden ihm bekannten Fahrer des betroffenen Modells mit einer Warnung persönlich an. Den Verunglückten erreichte dieses Schreiben indes nicht mehr. Obwohl der Motorradhersteller vor der Verwendung der Verkleidung ausdrücklich warnte, wurde das Unternehmen zu Schadensersatz verurteilt. Der BGH fällte in dieser Sache ein wegweisendes Grundsatzurteil:

Die Firmen müssen künftig nicht nur die Verlässlichkeit ihres Produkts in der Praxis beobachten, sondern vor allem ihre Kunden auf Gefahren im Tagesbetrieb hinweisen – auch auf solche, die durch Verwendung oder Einbau von Zubehör anderer Hersteller entstehen. [31]

28.4.8 Bewertung des Risikos möglicher Funktionsfehler nach der Markteinführung

Aufgrund von Vernetzung und Komplexität werden sämtliche Risiken automatisierter Fahrzeuge im Serienbetrieb nur schwer zu überblicken sein. Die zunehmende Sensibilität

Schaden-Eintrittswahrscheinlichkeit (E 1-7)	Verletzungsschwere (S 1-3)			Risikograd	Gefährdete Menschen		Gesunde Erwachsene				Schutz: z. B. Warnung Gefahr andauernd	
	AIS 0-2 z. B. S 0-1	AIS 3-4 z. B. S 2	AIS 5-6 z. B. S 3		Verletzung irreversibel	Verletzung teilweise reversibel	nein	ja	nein	ja		
häufig	häufig	wahr-scheinlich	wahr-scheinlich	katastrophal	Verletzung irreversibel	Verletzung teilweise reversibel	nein	ja	nein	ja	nein	
wahr-scheinlich	häufig	wahr-scheinlich	gelegentlich	ernst	Risiko nicht akzeptabel: Sofortige Maßnahmen erforderlich!		ja	ja	nein	nein		
gelegentlich	wahr-scheinlich	gelegentlich	selten	hoch	(Berücksichtigung der Safety Levels - ASIL)		ja					
selten	gelegentlich	selten	sehr selten	mittel	Risiko nicht toleriert: Maßnahmen erforderlich							
sehr selten	selten	sehr selten	sehr selten	gering	Risiko gesellschaftlich und individuell akzeptiert: Qualitätsmanagement (QM) und Kontrollen empfohlen							
sehr selten	sehr selten	sehr selten	sehr selten	tolerabel								
unwahr-scheinlich	unwahr-scheinlich	unwahr-scheinlich	unwahr-scheinlich	unbedeutend								

Abb. 28.6 Risikobeurteilung und Ableitung erforderlicher Maßnahmen in Anlehnung an RAPEX, ALARP und ISO 26262.
 Quellen: RAPEX, ADAS Code of Practice, ISO 26262, ALARP

für Mängel zeigt die deutliche Zunahme weltweiter Rückrufaktionen. Tauchen im Serienbetrieb bislang unbekannte Fehler auf, sind für diese gegebenenfalls nach einer Risikobewertung entsprechende Maßnahmen zu ergreifen.

Zur Risikoanalyse und Risikobeurteilung von Produktfehlern nach der Markteinführung – im Hinblick auf die Notwendigkeit bzw. Dringlichkeit von Rückrufaktionen – nutzen die EU und das deutsche Kraftfahrtbundesamt Tabellen des Schnellwarnsystems RAPEX (Rapid Exchange of Information System) [32]. Die Risikoeinstufung erfolgt zunächst über die *Verletzungsschwere* (Schadensausmaß S beispielsweise nach AIS) und die *Eintrittswahrscheinlichkeit* eines Schadens – ähnlich dem ALARP-Prinzip (As Low As Reasonable Possible) [33], dem ISO 26262-Standard [22] und dem Code of Practice für ADAS mit aktiver Längs- und Querführung [5, 6]. Daraus wird der *Risikograd* abgeleitet. Die abschließende Beurteilung der Dringlichkeit von erforderlichen Maßnahmen berücksichtigt ein Verletzungsrisiko der verletzungsgefährdeten Menschen (Einfluss von Alter, körperlicher Gesundheitszustand usw.) bzw. die Gefahr für einen mental gesunden Erwachsenen (Reaktionsfähigkeit, Risikobewusstsein usw.) und die Nutzung von Schutzmaßnahmen wie angemessene Warnhinweise (s. Abb. 28.6).

28.5 Fazit und Ausblick

Einerseits sind Erwartungen in der Gesellschaft verständlich, die zunehmend höchste Sicherheitsansprüche an neue Technologien nach „Stand der Wissenschaft und Technik“ fordern. Andererseits verhindert ein unrealistischer Anspruch an die technische Perfektion bzw. das Streben nach 100-prozentiger Fehlerfreiheit gegebenenfalls eine Markteinführung automatisierter Fahrzeuge und damit die Chance auf ein revolutionäres Nutzenpotenzial. Dadurch bleiben Innovationen aus.

Manche bahnbrechende Technologie stünde uns heute nicht zur Verfügung, hätten Vorsicht und Zurückhaltung bei ihrer Einführung die Oberhand gewonnen. Ein Beispiel für eine mutige Innovation zeigte der deutsche Ingenieur und Automobilpionier Carl Friedrich Benz. Bereits im Jahr 1885 absolvierte er mit seinem Prototyp, dem funktionstüchtigen Benz-Patent-Motorwagen, die ersten Testrunden. In seinem Buch *Lebensfahrt eines Erfinders* erinnert sich Benz an seine ersten Ausflüge:

Hatte ich meine Versuchsfahrten bis dahin mit besonderer Vorliebe weitab von der Stadt vorgenommen – auf dem Fabrikgelände oder draußen auf dem alten, einsamen Wall (Ringstraße), der damals noch um die Stadt Mannheim sich herumzog und fast gar nicht begangen war –, so scheute ich vom Frühjahr 1886 ab die Menschen und ihre Kritik nicht mehr. [34]

Als der Motorwagen allerdings bei einer Panne liegenblieb, erntete Benz Mitleid, Spott und Hohn:

Wie kann man sich in so einen unzuverlässigen, armseligen, lautlärmenden Maschinenkasten setzen. (...) Wenn ich einen solchen Stinkkasten hätte, würde ich zu Hause bleiben. [34]

Trotz aller Verneinung und Ablehnung als Antwort auf das nächtelange beständige Arbeiten an seiner Lebensaufgabe hielt Benz mit Unterstützung seiner Frau am Glauben an die Zukunft seines Patentwagens fest und wurde damit Wegbereiter für eine der bedeutendsten Innovationen moderner Mobilität. Die Vorbereitung auf Fahrzeuge mit fortgeschrittenem Automatisierungsgrad erfordert ebenfalls eine konsequente Vorgehensweise nach dem Vorbild von Benz.

Auch die Markteinführung hoch- und vollautomatisierter Fahrzeuge muss sich bislang mit Barrieren auseinandersetzen. Die ersten Anbieter am Markt und damit die Pioniere gehen zunächst erhöhte Risiken ein, sodass sich der mögliche gesamtgesellschaftliche Nutzen durch diese neue Technologie nur gemeinsam umsetzen lässt. Homann beschreibt diesen Entscheidungskonflikt bei der Markteinführung durch das entscheidungstheoretische Konzept des sogenannten Gefangenendilemmas. Zur Überwindung der bei hoch- und vollautomatisierten Fahrzeugen vorliegenden Dilemmasituation müssen die unüberschaubaren Risiken für die Hersteller durch neue institutionelle Arrangements bewertbar und entscheidbar gemacht werden [35]. Vorbehaltlose Information und transparente Politik fördern und forcieren den fachübergreifenden gesellschaftlichen Dialog.

Bis heute muss der Fahrer aufgrund von Zulassungsvorgaben bei Serienfahrzeugen stets seine Hände am Lenkrad behalten und besitzt permanent die Kontrolle über das Fahrzeug. Auch automatisierte Forschungsfahrzeuge sowie absehbare Fahrzeugentwicklungen von IT-Unternehmen, Automobilherstellern und Zulieferern werden in absehbarer Zeit bei komplexen Verkehrssituationen einen Fahrer als verantwortliche Rückfallebene voraussetzen.

Fahrerlose Fahrzeuge hingegen bedeuten den Beginn einer völlig neuen Dimension. Neue Ansätze und Aktivitäten sind unabdingbar [36]. Es gilt, sich an der zukünftigen Möglichkeit des vollautomatisierten Fahrens zu orientieren, aus Mustern der Vergangenheit zu lernen und bisherige Vorgehensweisen innerhalb der technischen Eignung und wirtschaftlichen Zumutbarkeit dem Stand der Wissenschaft bzw. der Technik anzupassen [37].

Neben einer allgemeinen Klärung der Verantwortung für Unfall- und Produktrisiken können möglicherweise neue begleitende Maßnahmen wie Schulungen oder spezielle Fahrzeugbeobachtungen zur erfolgreichen Markteinführung und zum sicheren Betrieb beitragen. Für den erforderlichen Informationsaustausch, die Speicherung von Fahrzeugdaten (beispielsweise Event Data Recorder) und möglichen kriminellen Eingriffen sind abgestimmte technische Schutzvorkehrungen vorzusehen (s. Kap. 25, 30). Neben abgestimmten Datenschutzrichtlinien werden Experten der Technikethik, beispielsweise in einem Code of Ethics, die Einhaltung ethischer Werte sicherstellen (vgl. Abb. 28.3, 28.4, 28.5). Dabei sind Sicherheitsanforderungen im Sinne der grundlegenden ethischen Frage „Wie sicher ist sicher genug?“ zu beantworten. Expertenerfahrungen können Entscheidendes zur Erhöhung der Sicherheit und zur Erfüllung von Kundenerwartungen bei akzeptablen Risiken beisteuern. Vor dem Hintergrund zunehmender Verbraucheranforderungen sind Expertenerfahrungen – insbesondere aus bisherigen Produkthaftungsverfahren – zur Erhöhung der Produktsicherheit im Entwicklungs- und Freigabeprozess unverzichtbar.

Zur Großserienvermarktung sicherer automatisierter Fahrzeugtechnologien – die sich zudem in einem vielschichtigen Gesamtsystem wiederfinden – sind interdisziplinär abgestimmte Prozesse erforderlich. Eine belastbare Beurteilung der Serienreife verlangt nach neuen harmonisierten Methoden für vergleichbare Sicherheitsnachweise, beispielsweise mittels Simulation relevanter Szenarien aus der Verknüpfung weltweit verfügbarer Unfalldaten (s. Kap. 17). Dies gilt ebenfalls für die Erfüllung gesetzlicher bzw. zulassungsrechtlicher Regelungen, bei der Ermittlung neuer Möglichkeiten zur Risikoverteilung (vgl. [38]) und bei der Schaffung von neuen Entschädigungseinrichtungen. Zum Nachweis der Sorgfaltspflicht im bestehenden Qualitätsmanagementsystem empfiehlt sich die Weiterentwicklung erfahrungsbasierter, international gültiger Richtlinien, Werkzeuge, Methodenbeschreibungen sowie Leitfäden mit Checklisten, die auf dem ADAS Code of Practice aufbauen [5, 39] und den praktizierten Stand von Wissenschaft und Technik innerhalb der technischen Eignung und wirtschaftlichen Zumutbarkeit repräsentieren und dokumentieren. Der ADAS Code of Practice wurde zur sicheren Inverkehrbringung künftiger Advanced Driver Assistance Systems mit aktiver Unterstützung der primären Fahraufgabe (Quer-, Längsführung inklusive vollautomatisierter Notbremseingriffe) erarbeitet und 2009 über die European Automobile Manufacturers Association (ACEA) veröffentlicht. Er korrespondiert mit der ISO 26262 zu den Anforderungen der funktionalen Sicherheit von elektrischen, elektronischen und programmierbaren Systemen. Als Entwicklungsleitlinie enthält er auch Empfehlungen für die Analyse und Beurteilung komplexer Mensch-Maschine-Interaktionen, wie sie im normalen Gebrauchsfall sowie im Fehlerfall auftreten können [5, 6]. Bei unerwarteten Fehlfunktionen, die zukünftig zu größeren Schäden führen können, sind Produktexperten aus der Entwicklung in die Ursachenforschung einzubeziehen und anzuhören. Sachverständige, die nicht direkt in die Entwicklung eingebunden sind, sollten sich die Fachkompetenz für eine fundierte Begutachtung neuer Technologien vor Gericht aneignen.

Automatisiertes Fahren erfordert in der Entwicklung vernetztes, fachübergreifendes Denken mit einem flexiblen und zugleich strukturierten Handlungsraum. Die Entwicklung erschließt bislang eine unbekannt Welt mit vielen Unsicherheiten, die Vorbehalte und Widerstände verursachen können. Für eine erfolgreiche Einführung serienreifer Fahrzeuge bilden *in vivo* gesammelte Erkenntnisse aus Vergangenheit und Gegenwart die entscheidende Voraussetzung. So wird die Serienreife trotz technischer, rechtlicher und ökonomischer Risiken zum Nutzen der Gesellschaft möglich.

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. 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
4. Bundesgerichtshof (2009) Zur Haftung eines Fahrzeugherstellers, BGH-Urteil vom 16.06.2009, Az. VI ZR 107/08, Karlsruhe
5. 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 Integrated Project, Response 3, European Automobile Manufacturers Association – ACEA, www.acea.be, Brüssel
6. Donner E, Winkle T, Walz R und 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), Sindelfingen, S. 231–241
7. Nader R (1965) Unsafe at Any Speed: The Designed-In Dangers of the American Automobile, Grossman Publishers, Inc., New York
8. Nader R (1972) Unsafe at Any Speed: The Designed-In Dangers of the American Automobile, Expanded edition, Grossman Publishers, Inc., New York
9. Kraftfahrtbundesamt Jahresberichte (2014) <http://www.kba.de>, Flensburg
10. United States of America (2000) Transportation Recall Enhancement, Accountability, and Documentation TREAD Act – H.R. 5164, and Public Law No. 106–414
11. Noll M, Rapps P (2012) Ultraschallsensorik, In: Winner H, Hakuli S, Wolf G (Hrsg.) Handbuch Fahrerassistenzsysteme, 2. Auflage, S. 110–122, Vieweg+Teubner, Wiesbaden
12. Krey V, Kapoor A (2012) Praxisleitfaden Produktsicherheitsrecht, Hanser, 2. Auflage, München
13. Köhler H (2012) BGB Bürgerliches Gesetzbuch, Deutscher Taschenbuch Verlag, 69. Auflage, München
14. European Commission (1985) Council Directive 85/374/EEC of 25 July 1985 on the approximation of the laws, regulations and administrative provisions of the Member States concerning liability for defective products, Brüssel
15. International Organization for Standardization (ISO), ISO 9001 (2015) Quality management systems – Requirements, Genf
16. International Organization for Standardization (ISO), ISO/TS 16949 (2009) Particular requirements for the application of ISO 9001 for automotive production and relevant service part organizations – Functional safety, Genf
17. Akamatsu M, Green P, Bengler K (2013) Automotive Technology and Human Factors Research: Past, Present and Future, In: International Journal of Vehicular Technology, Hindawi Publishing Corporation, Kairo, New York
18. Hartley R F (2011) Management Mistakes and Successes, 25th Anniversary Edition, 1. Auflage, USA 2011, S. 342
19. National Highway Traffic Safety Administration (2014) Recall: Electrical System: Ignition Switch, NHTSA Campaign Number: 14V-047, Report Receipt Date: February 7, 2014, <http://www.nhtsa.gov>
20. National Highway Traffic Safety Administration (2014) Additional Information on Toyota Recalls and Investigations, <http://www.nhtsa.gov>
21. National Highway Traffic Safety Administration (2014) Recall: Forward Collision Avoidance, Adaptive Cruise Control, Vehicle Speed Control, Accelerator Pedal, NHTSA Campaign Number: 14V293000, Report Receipt Date: June 4, 2014, <http://www.nhtsa.gov>
22. International Organization for Standardization (ISO), ISO 26262 (2011) Road Vehicles – Functional safety, Genf
23. Grunwald A (2013) Handbuch Technikethik, J.B. Metzler, Stuttgart

24. Merkel A, Töpfer K, Kleiner M, Beck U, Dohnany K, Fischer U, Glück A, Hacker J, Hambrecht J, Hauff V, Hirche W, Hüttl R, Lübbe W, Marx R, Reisch L, Renn O, Schreurs M, Vassilidis M, Bachmann G, Sauer I, Teuwsen R, Thiel G (2011) Ethik-Kommission Sichere Energieversorgung Deutschlands, Energiewende – Ein Gemeinschaftswerk für die Zukunft, Presse- und Informationsamt der Bundesregierung, S. 24 ff, Berlin
25. Association for the Advancement of Automotive Medicine (2005) The Abbreviated Injury Scale (AIS) Update 2008, Barrington IL
26. Werdich M (2012) FMEA – Einführung und Moderation – durch systematische Entwicklung zur übersichtlichen Risikominimierung, 2. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden
27. Verband Deutscher Automobilhersteller (2006) VDA-Band 4, Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie, Sicherung der Qualität vor Serieneinsatz – Produkt- und Prozess-FMEA, 2. Auflage, Frankfurt/Main
28. Heising B, Ersoy M, Gies, S (2013) Hardware-in-the-loop Simulation, In Fahrwerkhandbuch: Grundlagen, Fahrdynamik, Komponenten, Systeme, Mechatronik, Perspektiven, 4. Auflage, S. 574–575, Springer Vieweg, Wiesbaden
29. Maurer M (2012) Entwurf und Test von Fahrerassistenzsystemen. In: Winner H, Hakuli S, Wolf G (Hrsg.) Handbuch Fahrerassistenzsysteme, 2. Auflage, S.43–52, Vieweg Teubner, Wiesbaden
30. Bengler K, Zimmermann M, Bortot D, Kienle M, Damböck D (2012) Interaction Principles for Cooperative Human-Machine Systems. In: Information Technology, Wissenschaftsverlag Oldenburg
31. Bundesgerichtshof (1986) Zur Produktbeobachtungspflicht für Kombinationsrisiken – Gefahrenabwehrpflicht, BGH-Urteil vom 9.12.1986, Az. VI ZR 65/86, Karlsruhe
32. Europäische Union (2010) Amtsblatt L 22 – Entscheidung der Kommission zur Festlegung von Leitlinien für die Verwendung des gemeinschaftlichen Systems zum raschen Informationsaustausch RAPEX gemäß Artikel 12 und des Meldeverfahrens gemäß Artikel 11 der Richtlinie 2001/95/EG über die allgemeine Produktsicherheit, Luxemburg
33. 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 the Development and Evaluation, RESPONSE 2, European Commission, Final Public Report, Brüssel
34. Benz C (1925) Lebensfahrt eines deutschen Erfinders, Die Erfindung des Automobils, Erinnerungen eines Achtzigjährigen, Neuausgabe zur 50-jährigen Erinnerung, Koehler & Amelang, März 1936, Leipzig
35. Homann K (2005) Wirtschaft und gesellschaftliche Akzeptanz: Fahrerassistenzsysteme auf dem Prüfstand, In: Maurer M, Stiller C (Hrsg.) Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung, S. 239–244, Springer, Berlin, Heidelberg
36. 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
37. Scharmer O, Kaufer K (2013) Leading from the emerging future – from Ego-System to Eco-System economies – applying theory U to transforming business, society and self, Berrett-Koehler Publishers, San Francisco CA
38. 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
39. Becker S, Schollinski H-L, Schwarz J, Winkle T (2003) Introduction of RESPONSE 2, EU Projekt. In: M. Maurer, C. Stiller (Hrsg.), Workshop Fahrerassistenzsysteme – FAS, Leinsweiler

Barbara Lenz, Eva Fraedrich

Das autonome Fahren stellt eine Herausforderung nicht nur für die weitere technische Entwicklung, sondern auch für den Umgang mit den neuen technischen Möglichkeiten dar. Während Medienberichte über autonome Fahrzeuge in der jüngeren Zeit deutlich zugenommen haben, steht die öffentlich geführte Diskussion zu damit verbundenen Erwartungen, aber auch Befürchtungen noch ganz am Anfang. Fragen und Themen, die die Menschen in Verbindung mit dem autonomen Fahren bewegen, ebenso wie Erfahrungen, die bei der Einführung neuer Technologien in der Vergangenheit gemacht wurden und die es bei der Realisierung von autonomem Fahren zu bedenken gilt, sind Gegenstand der Kapitel in diesem letzten Teil des Buches. Dass diese Fragen das Buch abschließen, kommt nicht von ungefähr: Eine Technologie ist immer eingebettet in einen Rahmen, der darüber bestimmt ist, wie die Menschen mit dieser Technologie umgehen, welche Bedeutung sie ihr zuschreiben und auch, welche gesellschaftlichen Funktionen sie erfüllt. Dies ist auch die zugrunde liegende Motivation, das Buch mit dem Thema *Mensch und Maschine* zu beginnen und mit dem Thema *Akzeptanz* zu beschließen.

Gesellschaftliche und individuelle Akzeptanz des automatisierten Fahrens ist Gegenstand des Beitrags von Eva Fraedrich und Barbara Lenz. Die Autorinnen erläutern und diskutieren die Vielschichtigkeit von „Akzeptanz“ und versuchen, damit der oft inflationären und manchmal auch ungenauen Verwendung dieses Begriffes ein fundiertes Verständnis entgegenzusetzen. Was bedeutet es eigentlich, wenn Menschen eine neue Technologie „akzeptieren“? Anhand der Auswertung von Leser-Kommentaren in nationalen und US-amerikanischen Zeitschriften zeigen sie auf, welche Themen derzeit die Diskussion antreiben, und kommen dabei zu markanten Ergebnissen.

Ist die Einführung von autonomem Fahren eigentlich mit der Einführung einer Großtechnologie vergleichbar? Und wie gehen wir dann mit den Risiken um, die von dieser Großtechnologie ausgehen oder auszugehen scheinen? Armin Grunwald untersucht in seinem Beitrag *Gesellschaftliche Risikokonstellation für autonomes Fahren – Analyse, Einordnung und Bewertung* die Frage, welche Risikokonstellation beim autonomen Fahren

vorliegt und was aus den bisherigen Erfahrungen mit Risikodebatten zum technischen Fortschritt für Entwicklung und Einsatz des autonomen Fahrens gelernt werden kann. Der Autor entwickelt eine Reihe von Empfehlungen, die bei der Implementierung von autonomem Fahren Relevanz entfalten, und betont gleichzeitig die Notwendigkeit eines offenen und transparenten Austausches mit den potenziellen Nutzerinnen und Nutzern der neuen Technologie, aber auch den Verkehrsteilnehmern insgesamt.

Das autonome Fahren ist nicht als gänzlich neue Technologie zu verstehen, die quasi „aus dem Nichts“ kommt. Vielmehr schließt es immer auch an schon Vorhandenes an, z. B. an bestehende Alltagspraktiken der Nutzung eines (Individual-)Fahrzeugs. Vor diesem Hintergrund beschäftigten sich Eva Fraedrich und Barbara Lenz mit dem Thema *Vom (Mit-)Fahren: autonomes Fahren im Zusammenhang mit Autonutzung*. Auf der Grundlage einer empirischen Auseinandersetzung mit den Bedürfnissen, Empfindungen und Erfahrungen von Autonutzerinnen und -nutzern legen sie die Vielschichtigkeit der Einstellungen zur Automatisierung des Fahrens dar und zeigen insbesondere, in welchem Zusammenhang Vorbehalte zum autonomen Fahren stehen. Gleichzeitig machen sie deutlich, dass zum aktuellen Zeitpunkt die Bewertung von autonomem Fahren einerseits ganz wesentlich davon abhängig ist, welche gesellschaftlichen Gruppen dabei adressiert werden, und andererseits davon, um welche konkreten Anwendungen bzw. Szenarien es beim autonomen Fahren eigentlich geht.

Akzeptanz oder Nicht-Akzeptanz von autonomem Fahren wird sich früher oder später auch im (privaten oder gewerblichen) Kauf oder Nicht-Kauf eines autonomen Fahrzeugs zeigen. Wie verändert sich dabei die Bedeutung der Automarke angesichts der Tatsache, dass das „neue“ Auto mehr können muss als fahren? David Woisetschläger setzt sich in seinem Beitrag *Marktauswirkungen des automatisierten Fahrens* mit der Frage auseinander, was – aus Sicht der heutigen Autonutzer – künftig das relevantere Akzeptanzkriterium sein könnte: die Erfahrung des Autobauers oder die des Softwareherstellers. Er legt dar, dass derzeit die Kaufbereitschaft für ein autonomes Fahrzeug noch recht gering ausgeprägt ist und dass es dabei eher gleichgültig ist, in welcher Branche das Fahrzeug entwickelt worden ist; wichtiger ist, dass die Marke, unter der das Fahrzeug vertrieben wird, hohes Vertrauen genießt. Woisetschlägers Kapitel schließt mit seinem Beitrag zur individuellen Kaufbereitschaft diesen letzten Teil des Buches, indem ein Bogen von der generellen Akzeptanz hin zu eher individuellen Aspekten gespannt wird.

Eva Fraedrich, Barbara Lenz

Inhaltsverzeichnis

29.1 Einführung	640
29.2 Akzeptanz	641
29.2.1 (Technik-)Akzeptanz: Konzepte, Forschung und Ausprägungen	642
29.3 Akzeptanz des autonomen Fahrens: Forschungsstand und Forschungsschwerpunkte	645
29.4 Exploration des Themas aus der Perspektive von Verkehrsteilnehmerinnen und -teilnehmern	648
29.4.1 Methode	648
29.4.2 Ergebnisse	649
29.5 Fazit und Ausblick	656
Literatur	658

E. Fraedrich (✉)
Humboldt-Universität zu Berlin, Geographisches Institut, Deutschland
eva.fraedrich@geo.hu-berlin.de

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

„A good science fiction story should be able to predict not the automobile but the traffic jam“, meint Frederik Pohl ([41], S. 287).

29.1 Einführung

In der Diskussion um das autonome Fahren rückt neben technischen und rechtlichen Fragestellungen mehr und mehr auch die Frage in den Fokus, welche Einstellungen und Erwartungen künftige (potenzielle) Nutzerinnen und Nutzer, aber auch eine gesellschaftliche Öffentlichkeit der neuen Technologie entgegenbringen. Die aufkommende Debatte trägt der Annahme Rechnung, dass ein Wechsel vom konventionellen zum autonomen Fahren deutliche Veränderungen für alle Verkehrsteilnehmer mit sich bringen würde. Ausgehend von einer solchen individuellen wie auch gesellschaftlichen Nutzerperspektive stellt sich damit die Frage nach der Akzeptanz von autonomen Fahrzeugen: Inwieweit ist die oder der Einzelne bereit, ein vollautomatisiertes Fahrzeug zu nutzen, und inwieweit sind wir als Gesellschaft bereit, ein Verkehrssystem zu akzeptieren, in dem vollautomatisierte Fahrzeuge auf den Straßen unterwegs sind?

Die öffentliche Aufmerksamkeit für das autonome Fahren ist in der letzten Zeit deutlich gewachsen – in Befragungen gibt mittlerweile eine Mehrheit an, immerhin schon vom autonomen Fahren „gehört“ zu haben (vgl. [1]). In der massenmedialen Berichterstattung wird die Automatisierung des Fahrens häufig als Lösung für viele unserer Automobilbedingten Verkehrsprobleme vorgestellt; darüber hinaus wird erwartet, dass es zu einer Revolutionierung von Autonutzung und Autobesitz kommt. Der Begriff „autonomes Fahren“ weist allerdings in der öffentlichen Debatte noch starke definitorische Unschärfen auf, mal ist dabei vom automatisierten Fahren und von selbstfahrenden oder fahrerlosen Fahrzeugen die Rede, mal vom teil- oder vollautomatisierten Fahren. Häufig ist nicht ganz klar, um welche Arten der Beförderungsmöglichkeiten es sich handelt, welche konkreten Möglichkeiten und Potenziale, aber auch welche Risiken damit verbunden sind oder welche Herausforderungen auf dem Weg zum autonomen Fahren noch bewältigt werden müssen.

Die Perspektiven aus der Sicht von Verkehrsteilnehmern und potenziellen künftigen Nutzerinnen und Nutzern werden dabei wenig beachtet, wenngleich immer wieder betont wird, dass eine nutzer- sowie eine nutzenorientierte Betrachtung ganz wesentlich zur Akzeptanz und damit auch zum Erfolg automatisierter Fahrzeuge beitragen kann (vgl. [2], [3]). Die frühzeitige Einbindung der Akzeptanz-Thematik in die Debatte um autonomes Fahren ist notwendig, auch wenn die Realisierung eines Straßenverkehrs mit vollständig automatisierten Fahrzeugen derzeit noch gar nicht absehbar ist. Mit der Einführung der Technologie werden möglicherweise Veränderungen im gesamten Bereich der Mobilität einhergehen, die viele gesellschaftliche Ebenen betreffen und gleichzeitig einen fundamentalen Wandel der Art und Weise, wie wir uns fortbewegen, auslösen könnten. Um die wesentlichen Aspekte eines solchen Wandels frühzeitig zu kennen und den Wandel gegebenenfalls zu steuern, ist es wichtig, bedeutende Einflussfaktoren, und dazu gehört die Akzeptanz der Technologie, zu identifizieren und ihre Dynamik zu verstehen.

Der vorliegende Beitrag beginnt mit einer Bestimmung dessen, was unter (Technik-) Akzeptanz zu verstehen ist, und diskutiert anschließend, welche Forschungsschwerpunkte im Zusammenhang mit autonomem Fahren relevant sind. Der empirische Teil wird mit Ergebnissen aus aktuellen Studien zur Akzeptanz des autonomen Fahrens eingeleitet, bevor anschließend Ergebnisse einer eigenen Untersuchung vorgestellt werden, die der Sicht heutiger Verkehrsteilnehmerinnen und -teilnehmer nachspürt und auf diese Weise Erkenntnisse für künftige, noch stärker anwendungsbezogene Empirie zur Akzeptanz des autonomen Fahrens gewinnt.

29.2 Akzeptanz

Wenn die Rede von Akzeptanz ist, wird darunter ganz allgemein „annehmen, hinnehmen, billigen; anerkennen; mit jemandem oder etwas einverstanden sein“ verstanden ([4], S. 136). In diesen Formulierungen ist als Sinngehalt die „Bereitschaft zu etwas“ enthalten, was der Akzeptanz eine aktive Komponente gibt. Damit unterscheidet sie sich auch von der bloßen Duldung, dem Ausbleiben von Widerstand, aber auch von der Toleranz. Akzeptanz vollzieht sich im Rahmen von sozialen und technischen Konstruktionsprozessen – d. h., sie ist abhängig von Personen, deren Einstellungen, Erwartungen und Handlungen, ihrer Umwelt, ihrer Werte- und Normrahmung etc., aber auch von Veränderungen im Lauf der Zeit (vgl. [4], [5]). Der prozesshafte und wandelbare Charakter von Akzeptanz macht sie insgesamt zu einem „instabile(n) Konstrukt“ ([6], S. 25) – abhängig von Akzeptanzsubjekt, -objekt, -kontext, verschiedenen Ausprägungen und Typen; außerdem kann sie in ihrem zeitlichen Verlauf stark variieren [7].

Für die Akzeptanz einer konkreten Technologie wie dem autonomen Fahren bedeutet dies z. B., dass sowohl auf individueller als auch auf gesellschaftlicher Ebene neben technischen Optionen verschiedene Nutzungsoptionen oder auch Risikobefürchtungen gegeneinander abgewogen werden. Eine Technologie kann ihre „ursprüngliche Bestimmung“ auf diese Weise im Verlauf verändern, bevor sie schließlich stärker gefestigt oder sogar institutionalisiert wird – speziell der Verkehrsbereich ist voller Beispiele hierfür, angefangen bei der ursprünglichen Erfindung der Eisenbahn ausschließlich für Gütertransporte bis hin zur Nutzung von Kabinenseilbahnen als öffentliches Verkehrsmittel in dicht bebauten innerstädtischen Gebieten. Dieses Prozesshafte von Technikgenese und Technikaneignung stellt die Forschung zur Akzeptanz vor besondere Herausforderungen: In unterschiedlichen Phasen der Technologieentwicklung, -implementation und -aneignung sind jeweils verschiedene Akteure bzw. Akteursgruppen akzeptanzrelevant. Wenn man Akzeptanz im Rahmen eines solchen sozio-technischen Transformationsprozesses (vgl. [8]) betrachtet, müssen die verschiedenen Phasen des Prozesses unterschieden werden, denn sie entfalten je unterschiedliche Relevanz in Bezug auf die Akzeptanz.

29.2.1 (Technik-)Akzeptanz: Konzepte, Forschung und Ausprägungen

Das Thema Technikakzeptanz ist ein recht inhomogenes Feld; verschiedene Wissenschaftsdisziplinen (z. B. Psychologie, Soziologie, Wirtschaftswissenschaften etc.) nehmen wechselseitig aufeinander Bezug und bedienen sich gegenseitiger Anleihen. Insgesamt ist Akzeptanzforschung noch ein relativ junges Forschungsfeld: Erst in den 1970er Jahren kam mit einer breiteren öffentlichen Kritik an der Atomenergietechnik und einer daraus abgeleiteten und, wie sich im Nachhinein herausgestellt hat, eher unzulässig postulierten allgemeinen Technikfeindlichkeit der Deutschen (s. hierzu auch Kap. 30 zum Thema Risiko) vermehrt die Frage nach Akzeptanz auf ([9], [10], S. 45 ff.).

Die Ziele von Akzeptanzforschung bestehen einerseits darin, das jeweilige Akzeptanzphänomen besser verstehen zu können (sozialwissenschaftlich-empirische Analysen); andererseits soll es möglich werden, spezifische Akzeptanzobjekte, z. B. eine bestimmte Technologie, derart zu entwickeln und zu gestalten, dass Akzeptanz eintritt (normativ-ethische Ansätze). Auf wissenschaftlicher sowie politischer Ebene haben sich aus diesen Bedarfen heraus neben unterschiedlichen Forschungsansätzen mittlerweile auch mehrere Institutionen herausgebildet, die die Entwicklung von (neuen) Technologien und die dazugehörigen Debatten begleiten ([10], S. 47 ff.). Allen diesen Institutionen liegt im Kern die Annahme zugrunde, dass Technik nicht ohne ihre Einbettung in gesellschaftliche und wirtschaftliche, aber auch nutzenbezogene Bereiche betrachtet werden kann, letztendlich also ihre Einbettung in das sozio-technische System mitberücksichtigt werden muss (vgl. z. B. [10], [11]).

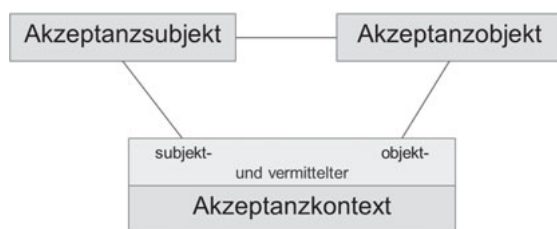
29.2.1.1 Akzeptanzsubjekt, -objekt und -kontext

Akzeptanz entfaltet sich immer in einem Spannungsfeld von Subjekt, Objekt und Kontext (vgl. [12], S. 88 ff.): „Anzugeben ist nicht nur, was, sondern was von wem innerhalb welcher Gesellschaft, in welcher Situation und zu welchem Zeitpunkt sowie aus welchen Gründen akzeptiert (oder eben abgelehnt) wird“ ([12], S. 90). Abbildung 29.1 zeigt die Beziehung zwischen Subjekt, Objekt und Kontext der Akzeptanz.

Akzeptanzsubjekt

Ein Akzeptanzsubjekt verfügt über Einstellungen oder entwickelt Einstellungen in Bezug auf den Gegenstand der Akzeptanz und verbindet sie gegebenenfalls auch mit entsprechenden Handlungen (vgl. [11], [12]). Der Begriff „Subjekt“ bezeichnet in diesem Zusammen-

Abb. 29.1 Akzeptanzsubjekt, -objekt und -kontext (angelehnt an [12], S. 89)



hang allerdings nicht nur Individuen, sondern kann sich auch auf Gruppen, Institutionen oder die Gesellschaft als Ganzes beziehen.

Eine Annäherung an die Akzeptanzsubjekte von autonomem Fahren kann derzeit z. B. über Nutzerinnen und Nutzer des Verkehrssystems hergestellt werden, die künftig entweder aktiv oder passiv mit autonomem Fahren zu tun haben. Infrage kommen also demnach alle, die in irgendeiner Form, sei es als Autofahrer, Radfahrer oder Fußgänger, am aktuellen Straßenverkehrssystem teilhaben. Weitere relevante Akzeptanzsubjekte sind darüber hinaus etwa Entwickler und Ingenieure, Politiker und Unternehmer oder auch öffentliche Forschungsinstitutionen.

Akzeptanzobjekt

Das Akzeptanzobjekt beschreibt nicht unbedingt ein Objekt im eigentlichen Sinn, sondern bezieht sich auf die Aneignung von „Angebotem, Vorhandenem oder Vorgeslagenem“ ([12], S. 89). Dies kann Technik bzw. Technologie sein, es können aber auch Artefakte aller Art oder Personen, Einstellungen, Meinungen, Argumente, Handlungen oder gar die dahinterstehenden Werte und Normen sein. Ein solches Objekt erfährt seine Bedeutung wiederum erst durch individuell oder gesellschaftlich vorgenommene Zuschreibungen – es gibt also gar nicht *das* autonome Fahren an sich; die Frage ist vielmehr, welche spezifischen Funktionen autonomes Fahren erfüllen kann und welche individuelle und gesellschaftliche Bedeutung die Technologie darüber erfährt. Dahinter steht die Annahme, dass Technik und Technologien keine Bedeutung per se haben, sondern diese erst im Zusammenhang mit der Erfüllung sozialer Funktionen, menschlichem Handeln und der Einbettung in gesellschaftliche Strukturen erlangen (vgl. [8]).

Akzeptanzkontext

Der Akzeptanzkontext beschreibt das Umfeld, in dem sich ein Akzeptanzsubjekt auf ein Akzeptanzobjekt bezieht – und kann somit nur in Abhängigkeit von diesen beiden betrachtet werden. Der Kontext von autonomem Fahren beispielsweise ist u. a. bestimmt durch die derzeitige individuelle oder soziale Bedeutung der Autonutzung: Warum nutzen Menschen das Auto? Welche Einstellungen, Werte, Erwartungen etc. liegen der (auto)mobilen Praxis zugrunde? Fügt sich das autonome Fahren hier nahtlos ein – oder wird es die Bedeutung der (Auto)Mobilität und deren Normensystem verändern?

29.2.1.2 Dimensionen von Akzeptanz

In der vielfältigen Literatur zu Akzeptanz und zur Akzeptanzforschung wurden unterschiedliche Dimensionen bzw. Ebenen identifiziert, auf denen Akzeptanz sichtbar und vor allem erfassbar wird. Im Folgenden wird insbesondere auf die Einstellungs-, Handlungs- und Wertdimension von Akzeptanz eingegangen.

Einstellungsdimension

Auf der Ebene der Einstellungen werden Haltungen, Wertungen, Einschätzungen usw. von Akzeptanz erhoben – Einstellungen können dabei sowohl auf individueller als auch auf gesellschaftlicher Ebene abgefragt und interpretiert werden. Fragen zur Genese von Technik,

ihre spezifischen Nutzungsformen oder die damit verbundenen Herausforderungen und Rahmenbedingungen im jeweils spezifischen Kontext können mit solchen Einstellungsmessungen gleichwohl nicht erfasst werden ([10], S. 46). Einstellungen haben aber für die Akzeptanzforschung deshalb Bedeutung, weil angenommen wird, dass diese als Absichten und Bereitschaften zu konkreten Handlungen gelesen werden können ([12], S. 82 f.).

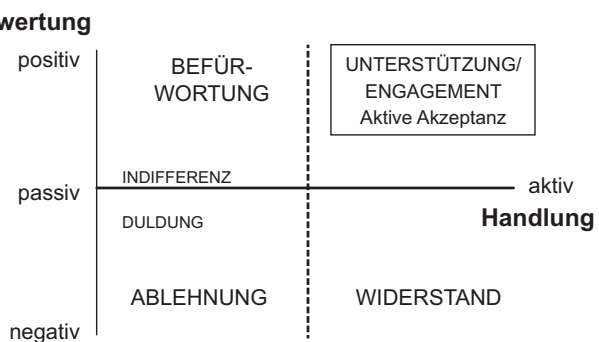
Das typische Messinstrument der Einstellungsdimension von Akzeptanz ist die Meinungsumfrage – auch wenn solche Erhebungen „... schnell zu einem vereinfachten Bild eines Meinungsbildungsprozesses auf der Basis wahrgenommener Eigenschaften von Technik ...“ führen ([13], S. 35), denn sie implizieren, dass Technik Signale aussendet, die wiederum bei der Bevölkerung bzw. Individuen bestimmte Reaktionen auslösen. Die eindimensionale Erfassung von Einstellungen wurde allerdings im Laufe der letzten Jahre mit erweiterten Erkenntnissen zur Technikakzeptanz abgelöst und um Analysen erweitert, die insbesondere den Kontext solcher Einstellungen mit einbeziehen. Auf diese Weise wurde der Fokus von Akzeptanzforschung von der „deskriptive(n) Bestandsaufnahme von Einstellungen und Haltungen“ ([13], S. 36) hin zu einer eher analytisch ausgerichteten Sichtweise verschoben. Damit wird der Komplexität von Wahrnehmung und Bewertung durch Individuen, der Subjektivität auch von Expertinnen und Experten sowie der Bedeutung von Kontextabhängigkeit stärker Rechnung getragen [13].

Handlungsdimension

Die Handlungsdimension von Akzeptanz beschreibt das beobachtbare Verhalten, wobei sich Handeln in diesem Sinn sowohl auf Tun als auch auf Unterlassen beziehen kann. (Handlungs-)Aktivitäten können sich vielfältig äußern, so z. B. im Kauf, in der Nutzung, in der Propagierung (oder dem Gegenteil davon: etwa dem Initiieren von Protesten) oder in der Unterstützung von (Entscheidungs- und Planungs-)Aktivitäten.

Häufig wird die Handlungsdimension als eigentliche oder tatsächliche Ebene der Akzeptanz betrachtet, so z. B. bei Lucke (vgl. [12], S. 82). Andere Autorinnen und Autoren sehen dagegen eine konkrete Handlungsabsicht bzw. eine Handlung als nicht zwingend für Akzeptanz ([14], S. 19; [15], S. 11). Die wechselseitige Bezugnahme auf Handlungs- und Einstellungsdimension haben Schweizer-Ries et al. ([15], S. 11) in einem zweidimensionalen Modell abgebildet (s. Abb. 29.2).

Abb. 29.2 Zwei Dimensionen des Akzeptanzbegriffs ([15], S. 11)



Wertdimension

Die Wertdimension wird in vielen Ansätzen nicht als eigenständige Ebene von Akzeptanz betrachtet, sondern mit der Einstellungsdimension zusammengefasst. Werte und Normen, so die Argumentation, sind auch Basis von Einstellungen und daher nur schwer von diesen zu trennen. Relevanz entfaltet die Wertdimension aber z. B. dann, wenn Akzeptanz auf der Handlungsebene beobachtet werden kann (etwa in der Nutzung eines spezifischen Produkts), obwohl sie möglicherweise gar nicht oder nur bedingt mit subjektiv-individuellen Werten übereinstimmt – eine Person kann ein Auto nutzen und besitzen, aber gleichzeitig an einem stark ökologischen Leitbild orientiert sein, das sich wiederum in anderen Handlungsbereichen deutlicher zeigen kann (beispielsweise darin, generell nur im Bio-Supermarkt einkaufen zu gehen). Als durchaus herausfordernd werden im Zusammenhang mit autonomem Fahren auf einer gesellschaftlichen Ebene ethische Kriterien bzw. Maßstäbe betrachtet, die der Bewertung zum autonomen Fahren zugrunde liegen (müssen) (s. Kap. 4 und Kap. 5). Generell wird ein Akzeptanzobjekt immer auch in Abhängigkeit von einem vorhandenen Normen- und Wertesystem bewertet (vgl. [13]).

29.2.1.3 Forschung zu Akzeptanz

Akzeptanz vollzieht sich nicht nur auf verschiedenen Ebenen (s. o.), sondern ist auch das Ergebnis eines komplexen individuellen und kollektiven Bewertungs- und Aushandlungsprozesses und manchmal sogar von relativ unspezifischen „Befindlichkeiten“ ([7], S. 55). Damit geht auch die Frage einher, wie ein solcher Prozess messbar und damit empirisch zugänglich gemacht werden kann. Für eine relativ neue Technologie wie das autonome Fahren gilt es zudem zu bestimmen, auf welche Weise einzelne Akteure (z. B. Nutzerinnen und Nutzer), soziale Gruppen, Organisationen und Institutionen den Herausforderungen des technisch-wissenschaftlichen Fortschritts begegnen. Damit verbunden ist auch das Ziel, „... Gestaltungspotenziale für gesellschaftliche Herausforderungen zu identifizieren und technologische Optionen im Hinblick auf ihren Problemlösungsbeitrag zu prüfen ...“ ([11], S. C).

Für die Akzeptanzforschung kann zusammenfassend festgehalten werden, dass Akzeptanz „... ein komplexes, vielschichtiges Konstrukt ist, das nicht direkt und unmittelbar messbar ist, und für das auch keine ‚geeichten‘ Messinstrumente zur Verfügung stehen ...“ ([11], S. 21). In Abhängigkeit von dem zu untersuchenden Akzeptanzobjekt, aber auch abhängig von den relevanten Dimensionen können nur jeweils spezifische Indikatoren operationalisiert und messbar gemacht werden – damit werden andere wiederum zwangsläufig ausgeschlossen. Dies gilt es, im Forschungsprozess mit zu reflektieren.

29.3 Akzeptanz des autonomen Fahrens: Forschungsstand und Forschungsschwerpunkte

Autonomes Fahren kann den Produkt- und Alltagstechniken zugerechnet werden; im Gegensatz zu Arbeitstechniken und sogenannter externer Technik wie beispielsweise Kern-

energietechnik, Satellitentechnik etc. werden die Produkt- und Alltagstechniken hauptsächlich über den Markt gesteuert und sind eher individuelles Konsumprodukt, dessen Folgen allerdings auch Dritte betreffen können ([13], S. 31). Autonutzung und -besitz sind typische Beispiele aus dem Bereich der Produkt- und Alltagstechnik. Akzeptanz der Technik bedeutet in diesem Zusammenhang vor allem den Kauf, schließt aber in der Regel auch die Nutzung mit ein. Für das autonome Fahren kann allerdings angenommen werden, dass vor allem zu Beginn einer möglichen Implementation nicht nur die Ebene des privaten bzw. individuellen Konsums eine Rolle spielt, sondern dass auch die Auswirkungen auf unterschiedliche gesellschaftliche Bereiche öffentlich diskutiert und abgewogen werden. Hier könnte es dann z. B. um die Frage gehen, ob Fahrzeuge in unserem Verkehrssystem zugelassen werden können, die wahrscheinlich genau wie konventionelle Fahrzeuge in Unfälle verwickelt sein werden – allerdings mit dem Unterschied, dass dann möglicherweise der Fahrroboter bzw. die Maschine einen solchen Unfall schuldhaft verursacht und auf diese Weise nicht nur die Sicherheit der jeweiligen Fahrzeuginsassen gefährdet hat, sondern die aller Verkehrsteilnehmer. Letztlich ginge es also auch um eine Frage des Gemeinwohls (vgl. hierzu insbesondere Kap. 30 zur Risikobewertung und Kap. 4 zur Ethik des autonomen Fahrens). Denkbar sind auch andere soziale oder ökonomische Risiken oder Folgen, die mit dem autonomen Fahren einhergehen könnten und damit im Fokus der öffentlichen Auseinandersetzung stehen werden. Empirisch von Bedeutung wird daher auch sein, die Grenzen zwischen diesen beiden Bereichen, den individuellen und gesellschaftlichen Aspekten von Akzeptanz, möglichst klar herauszuarbeiten und zu klären, „... wie Zuschreibungen von Techniken als intern oder extern gesteuert zustande (kommen)“ ([13], S. 32). Generell kann für Deutschland keine Technikfeindlichkeit festgestellt werden, und für den Bereich der individuell genutzten Techniken gilt sogar eher umgekehrt, dass in Deutschland Produkte aus dem Bereich der Alltagstechnik in großem Umfang in vielen Haushalten zur Verfügung stehen und genutzt werden (vgl. [9], [16]).

Im Zusammenhang mit der Akzeptanz von autonomem Fahren ist häufig die Rede davon, dass autonome Fahrzeuge nur dann akzeptiert würden, wenn sie einerseits „besser“ fahren würden als der Mensch und andererseits die Fahrzeugnutzerin oder der Fahrzeugnutzer als „letzter Kontrollentscheider“ die autonome Funktion überstimmen könnte (vgl. [3], S. 2 ff.) – dass Risikowahrnehmung aber um ein Vielfaches komplexer ist, als solche Aussagen vermuten lassen, erläutert u. a. Grunwald in diesem Band (s. Kap. 30).

Analogien zu anderen Technologien und damit Akzeptanzerfahrungen aus diesen Bereichen sind tendenziell nur schwierig herzustellen. Obwohl es heute schon viele Beispiele automatisierter Verkehrssysteme gibt (etwa Flugzeug, Schiff, (U-)Bahn oder Fahrzeuge im Militärbereich), ist ihnen allen gemeinsam, dass sie immer noch über eine menschliche Kontroll- bzw. Steuerungsinstanz verfügen – ein Fahrzeug oder Mobilitätssystem ohne diese menschliche Instanz gibt es derzeit noch nicht ([3], S. 6). Aus diesem Grund könnte autonomes Fahren auch ganz spezifische Anforderungen an Akzeptanz nach sich ziehen.

Welche Faktoren, Ausprägungen, Anforderungen, Erwartungen, Werthaltungen von wem und an wen oder was etc. überhaupt in Zusammenhang mit der Akzeptanz autonomen Fahrens stehen, ist derzeit empirisch noch nicht ausreichend erfasst. Einige Untersuchun-

gen aus der Markt- und Meinungsforschung, die sich mit dem Thema befassen, haben zwar eine generelle und auch zunehmende Offenheit gegenüber dem autonomen Fahren feststellen können (vgl. [1], [15], [16], [17], [18]). Nicht klar ist dabei allerdings, was die Befragten unter „autonomen Fahren“ eigentlich verstehen, in welchen Kontext ihre Wahrnehmungen und Bewertungen eingebettet sind und welche Herausforderungen und Hürden, aber auch welcher Nutzen im Zusammenhang mit dem autonomen Fahren identifiziert werden können.

Auf Nutzerseite unterliegen Befragungen, die Einschätzungen zum autonomen Fahren direkt abprüfen, derzeit außerdem noch der Herausforderung, dass bisher weder von einem breiten Kenntnisstand noch von konkreten Erfahrungen mit der Technologie ausgegangen werden kann. Solche erfassten Einstellungen und Bewertungen sind deshalb möglicherweise auch nur bedingt valide, denn der Gegenstand der Befragung ist, weil kaum bekannt, noch nicht eindeutig definiert. Dies legen auch Peters und Dütschke in ihrer Untersuchung über Akzeptanz von Elektromobilität nahe: „Befragungen potenzieller Nutzer etwa per Fragebogen, ob bzw. unter welchen Umständen sie bereit wären, ein Elektroauto zu kaufen, haben das Problem, dass Einschätzungen zu dem neuen, noch wenig bekannten System der Elektromobilität für die Konsumenten schwierig sind. Sie beruhen in der Regel auf einem Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen auf der Basis bisheriger Mobilitätsmuster“ ([19], S. 6). Eine vergleichbare Einschätzung kann wohl auch auf das autonome Fahren übertragen werden.

Die wenigen Untersuchungen, die Aspekte von Akzeptanz autonomen Fahrens in den Blick genommen haben, vermitteln teilweise ein recht heterogenes Bild: Frost & Sullivan zeigen in ihrer Studie zu aktiven und passiven Sicherheitssystemen, dass bei der Mehrheit der Autonutzerinnen und -nutzer bisher ein grundsätzlicher Widerstand gegenüber der Vorstellung besteht, die Kontrolle über die Steuerung ihres Fahrzeugs an eine Maschine bzw. einen Roboter abzugeben [20]. Andere Befragungen wiederum zeigen, dass vor allem jüngere Fahrerinnen und Fahrer zwischen 19 und 31 Jahren das Fahren selbst oft als lästig empfinden – die Fahraufgabe verhindere nämlich, dass man sich während der Fahrt anderen, als wichtiger, bedeutungsvoller oder interessanter eingeschätzten Tätigkeiten widmen kann: „Regulation keeps trying to say texting is distracting to driving but for the consumer it is really the driving that is distracting to texting“ ([21], S. 2). Eine Umfrage zu Wünschen von Europäerinnen und Europäern an das zukünftige Auto hat außerdem ergeben, dass etwa zwei Drittel der Befragten dem autonomen Fahren gegenüber eher aufgeschlossen sind [18], und eine internationale Erhebung, bei der Autofahrerinnen und Autofahrer aus Deutschland, China, den USA und Japan befragt wurden, konnte zwar einerseits eine prinzipielle Offenheit gegenüber dem autonomen Fahren konstatieren, aber andererseits auch zeigen, dass über alle Länder hinweg eine große Zahl der Befragten derzeit an der sicheren Funktionsweise der Technologie (noch) Zweifel hat oder diese sogar eher beängstigend findet [1].

29.4 Exploration des Themas aus der Perspektive von Verkehrsteilnehmerinnen und -teilnehmern

Bei der Frage nach der Akzeptanz des autonomen Fahrens muss es, auch vor dem Hintergrund der oben beschriebenen mangelnden Eindeutigkeit der Empirie, zuallererst darum gehen, herauszufinden, wie das Akzeptanzobjekt überhaupt wahrgenommen wird und auch, welche Aspekte mit der Technologie in Verbindung gebracht werden, die entweder auf einer gesellschaftlichen oder einer individuellen Ebene akzeptanzrelevant sind. Ziel muss es sein, erste Hinweise in Bezug auf die Einstellungs- und Wertdimension der Akzeptanz zu gewinnen sowie konkrete Erwartungen, Hoffnungen, Wünsche, aber auch Befürchtungen zu identifizieren, die mit der Technikentwicklung, -nutzung und -gestaltung verbunden werden (vgl. [11]). Den Auftakt der Arbeiten zur individuellen und gesellschaftlichen Akzeptanz, die im Rahmen des Projektes „Villa Ladenburg“ durchgeführt wurden, bildete deshalb eine Explorationsstudie, die die Perspektive der heutigen Verkehrsteilnehmer ganz allgemein und damit auch möglicher künftiger Nutzerinnen und Nutzer von autonomen Fahrzeugen betrachtet und dabei wesentliche Aspekte des wahrgenommenen Nutzens aus einer subjektiven Perzeption heraus in den Blick nimmt. Die Erhebung adressiert auch Unterschiede, die zwischen verschiedenen kulturell-gesellschaftlichen Umfeldern registriert werden können – in diesem Fall zwischen Deutschland und den USA, die zu den tonangebenden Ländern im Automobilbereich zählen und wo eine breitere Diskussion um autonomes Fahren schon begonnen hat. Dies zeigt in erster Linie die mediale Berichterstattung zum Thema, die in den letzten zwei Jahren merklich zugenommen hat und ein Indikator dafür ist, dass autonomes Fahren allmählich an gesellschaftlicher Aufmerksamkeit gewinnt.

29.4.1 Methode

Im Rahmen der Untersuchung wurden Aussagen aus Kommentaren zum autonomen Fahren analysiert. Der methodische Zugang erfolgte über die Auswertung der Rezeption von Online-Artikeln weit verbreiteter Printmedien; diese Rezeption ist in Form von online verfügbaren Kommentaren seitens der Nutzerinnen und Nutzer nachvollziehbar. Die Herangehensweise bezieht insbesondere die Annahme mit ein, dass der mediale Diskurs einen entscheidenden Einfluss auf die individuelle und gesellschaftliche Meinungsbildung hat (vgl. [22]). Ein Kriterium für die Auswahl der Artikel war, dass die Online-Nachrichtenportale, in denen sie veröffentlicht wurden, ein „repräsentatives“ Bild der deutschen und US-amerikanischen Printmedienlandschaft spiegeln und somit davon ausgegangen werden kann, dass die Artikel den aktuellen öffentlichen Diskurs zum autonomen Fahren einerseits wiedergeben und andererseits mitprägen. Für Deutschland wurden Kommentare zu Beiträgen aus Bild [23], Die Welt [24], Frankfurter Allgemeine Zeitung [25], Heise online [26], Spiegel Online ([27], [28], [29]), Süddeutsche.de [30] und Zeit Online [31], für die USA Los Angeles Times [32], NY Daily News [33], The New York Times [33], San Francisco

Chronicle [34], The Wall Street Journal [36] und The Washington Post [37] ausgewertet. Insgesamt wurden auf diese Weise 827 Kommentare zu 16 Artikeln analysiert. Die meisten Artikel bezogen sich auf die Straßenzulassung der Google Driverless Cars in Kalifornien Ende September 2012, um eine möglichst gute Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Im Sinne einer „konzeptuellen Repräsentativität“ wurde ein theoretisches Sampling vorgenommen ([38], S. 154 ff.), d. h., im Verlauf der Analyse wurden stufenweise weitere Kommentare ausgewertet, die schließlich drei Vergleichsgruppen zugeordnet werden konnten: (1) Kommentare aus deutschen Massenmedien-Portalen, (2) Kommentare aus US-amerikanischen Massenmedien-Portalen und (3) Kommentare aus einem technologieaffinen, deutschen Portal (Heise online). Die Auswertung erfolgte mittels qualitativer Inhaltsanalyse nach Mayring [39], deren Ziel es ist, (insbesondere die nicht offenkundigen) Bedeutungen von Texten mithilfe einer systematischen und intersubjektiv überprüfbareren Analyse, die der Interpretationsbedürftigkeit und Bedeutungsfülle sprachlichen Materials gerecht wird, herauszuarbeiten. Das Resultat der (zusammenfassenden) Inhaltsanalyse ist ein induktiv entwickeltes Kategoriensystem ([39], S. 67 ff.), das darstellt, wie das Thema „autonomes Fahren“ aus Sicht der Online-Kommentierenden diskutiert und verhandelt wird, welche Aspekte und Eigenschaften wahrgenommen und auf welche Art diese bewertet werden. Dazu wurden alle Kommentare kodiert – die kleinste Kodiereinheit innerhalb eines Kommentars war ein einzelnes Wort. Auf diese Weise wurden insgesamt 1421 Kodierungen vorgenommen und in aufeinanderfolgenden Reduktions- und Abstraktionsschritten zum Kategoriensystem zusammengefasst.

29.4.2 Ergebnisse

Das aus knapp sechzig Kategorien und Subkategorien bestehende Kategoriensystem ist auf zwei Ebenen verteilt: Auf einer objektbezogenen und gleichzeitig eher sachlichen Ebene wurden Aussagen erfasst, die (positive sowie negative) wahrgenommene Eigenschaften der Technologie sowie daran angeschlossene Themen zu allgemeinen und spezifischen Entwicklungsmöglichkeiten, aber auch zu rechtlichen Rahmenbedingungen, Haftungsvarianten etc. beinhalten – solche Aussagen sind vor allem am Akzeptanzobjekt orientiert und gleichzeitig eng mit dem Akzeptanzkontext verknüpft. Auf einer stärker emotionalen Ebene geht es dagegen um das Akzeptanzsubjekt – Aussagen werden meist in direkten Bezug zur eigenen Person gesetzt und beinhalten Einstellungen, Bewertungen und subjektive Motivationen zum autonomen Fahren. Auch diese sind wiederum meist stark mit dem Akzeptanzkontext verbunden, beispielsweise mit dem Kontext von Autonutzung und -besitz. Rund 15 Prozent aller Aussagen konnten dem Forschungsgegenstand nicht zugeordnet werden und blieben daher ohne Relevanz. Abbildung 29.3 zeigt das Kategoriensystem in einer reduzierten grafischen Übersicht, und Tab. 29.1 enthält die prozentuale Verteilung der Aussagen auf zwei Ebenen sowie die allgemeinen Kennzahlen der Erhebung.

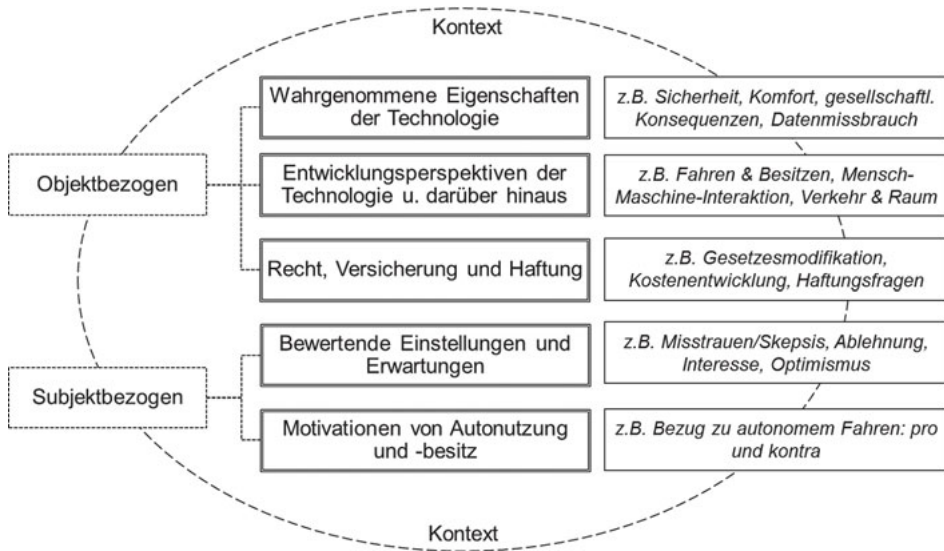


Abb. 29.3 Zwei-Ebenen-Kategoriensystem

Tab. 29.1 Verteilung von Aussagen, allgemeine Kennzahlen

	D	USA	Heise online		D	USA	Heise online
<i>Ebene</i>	<i>Nennung in %</i>			<i>Ebene</i>	<i>Nennung in %</i>		
Sachlich/objektbezogen	43%	47%	48%	Affektiv/subjektiv	43%	32%	33%

	D	USA	Heise online
<i>Politisch-ideologische Konnotation</i>	0%	8%	0%
<i>Aussagen ohne Relevanz</i>	14%	13%	19%
Kommentare gesamt	314	322	191
Fälle gesamt	214	221	82
Kodierungen gesamt	536	527	358

29.4.2.1 Objektbezogene Ebene

Wahrgenommene Eigenschaften und Folgen autonomer Fahrzeuge

Verteilt auf die drei Vergleichsgruppen (Massenmedien D bzw. USA; technologieaffin/Heise online) konnten zwischen 43 und 48 Prozent aller Aussagen der objektbezogenen Ebene zugeordnet werden – eine Auswahl der Kategorien und ihrer prozentualen Verteilung zeigt Tab. 29.2. In den Kommentaren werden konkrete Erwartungen in Bezug auf die Eigenschaften autonomer Fahrzeuge geäußert, aber auch in Bezug auf mögliche

Tab. 29.2 Aussagenverteilung von n = 647 auf einer sachlich-objektbezogenen Ebene

	D	USA	Heise online		D	USA	Heise online
<i>Kategorie</i>	<i>Nennung in %</i>			<i>Kategorie</i>	<i>Nennung in %</i>		
Eigenschaften, Folgen autonomer Fahrzeuge	60%	66%	27%	Haftung, Versicherung & Recht	21%	16%	19%
<i>Positiv</i>	71%	61%	70%	Haftungsthemen	75%	34%	51%
Sicherheit, Zuverlässigkeit	39%	39%	37%	Gesetzesmodifikation	19%	8%	28%
Flexibilität, Komfort	28%	18%	30%	Kostenentwicklung	6%	24%	18%
Beitrag zur Verkehrsoptimierung	11%	11%	9%	Zivilrechts-Ausinandersetzungen	0%	34%	3%
Integrative Verkehrsteilnahme	8%	10%	0%	Entwicklungsperspektiven	19%	18%	54%
Fortschritt	5%	17%	6%	Gesellschaft & Allgemein	11%	11%	9%
Nachhaltigkeit	5%	3%	9%	Technik & Fahrzeugdesign	23%	29%	35%
Kostensparnis	4%	2%	9%	Mensch-Maschine-Interaktion	2%	7%	25%
<i>Negativ</i>	29%	39%	30%	Verkehr & Raum	25%	11%	7%
Gesell. Konsequenzen	47%	63%	22%	Fahren & Besitzen	39%	29%	24%
Datenmissbrauch	18%	11%	14%	Fragen	0%	13%	0%
Mängel technischer Infrastruktur	15%	11%	0%				
Teuerung	10%	5%	57%				
Unklarheiten	10%	10%	7%				

Veränderungen und Folgen von Verkehrs- und Gesellschaftssystem sowie des rechtlichen Rahmens. Mindestens zwei Drittel solcher antizipierten Eigenschaften und Konsequenzen sind deutlich positiv konnotiert, in den deutschen Medien-Kommentaren sind es sogar um die 70 Prozent. Sie können sich z. B. auf einen erwarteten Sicherheitsvorteil autonomer Fahrzeuge beziehen, von denen erwartet wird, in Zukunft Unfälle im Straßenverkehr deutlich zu reduzieren, wenn nicht sogar gänzlich zu verhindern – ein User formuliert es so: „Eigentlich sollte so ein Auto aber wesentlich sicherer unterwegs sein als mit Fahrer. Denn es hat viel mehr Sensoren für die Wahrnehmung zur Verfügung, kann in alle Richtungen gleichzeitig gucken und hat eine Reaktionsfähigkeit nahe null.“

Auf der negativen Seite werden vor allem gesellschaftliche Konsequenzen befürchtet, darunter etwa der Verlust von Arbeitsplätzen: „Woran diese Typen arbeiten, ist konkret der Wegfall der deutschen Autoindustrie. Kein Kerl wird sich noch einen Porsche oder einen dicken Benz kaufen, wenn er damit genau so herumgeschwurbelt wird wie Otto Normal-

verbraucher. ... Wegfall der deutschen Autoindustrie bedeutet: ca. 25 Prozent hochstqualifizierte Arbeitsplätze weniger.“

Weitere Aspekte, die mit autonomen Fahrzeugen in den Aussagen in Verbindung gebracht wurden, waren – auf der positiven Seite – Flexibilität und Komfort, Verkehrsoptimierung und Effizienz, integrative Verkehrsteilnahme („Fahr-Ertüchtigung“ von derzeit eingeschränkten Verkehrsteilnehmern), allgemeiner Fortschritt, der mit der Technologie einhergeht, und Kostenersparnis. Auf der negativen Seite wurden neben befürchteten gesellschaftlichen Konsequenzen außerdem die Themen Datenmissbrauch, Mängel in der technischen Infrastruktur – also die Annahme, dass solche Fahrzeuge nicht sicher (genug) sein werden – Teuerung und relativ unspezifisch formulierte Unklarheiten bezüglich der Funktionsweise des Fahrzeugs genannt. Damit existiert zu den auf der positiven Seite wahrgenommenen Eigenschaften auch mehrfach deren negativer Gegenpart (Sicherheit versus Mängel, Kostenersparnis versus Teuerung, Fortschritt versus gesellschaftliche Konsequenzen).

Haftung, Versicherung und Recht

Themen, die der Auswertung zufolge vor allem in Deutschland besonders präsent zu sein scheinen, sind Haftung, Versicherung und Recht – mit erwarteten Modifikationen von gesetzlichen Rahmenbedingungen gehen auch versicherungstechnische Veränderungen einher. Für fast die Hälfte der Aussagen dazu auf den deutschen Massenmedienportalen bedeutet dies in erster Linie Unsicherheit: „Dieses Auto ist kein technisches, sondern ein juristisches Problem. Wer ist denn schuld, wenn das Auto einen Unfall baut? Der Fahrer oder Google?“, meint dazu ein User. Aber auch in den US-amerikanischen Kommentaren wird ein offensichtlich länderspezifisches Problem thematisiert, wenn auch häufig eher ironisch – die als streit- und prozesssüchtig charakterisierte Autoversicherungs- und -haftungs-Anwaltschaft könnte einer Einführung von autonomen Fahrzeugen im Weg stehen: „Leave it to the trial lawyers to spoil the party!“ fasst diese Auffassung in einem Satz zusammen. Außerdem werden bei diesem Thema noch Fragen nach künftig notwendiger Gesetzesmodifikation und der Kostenentwicklung im Versicherungsbereich diskutiert.

Entwicklungsperspektiven zum autonomen Fahren

Vor allem auf Heise online befassen sich viele der Kommentar-Schreibenden mit Entwicklungsperspektiven im Zusammenhang mit autonomem Fahren, die bereits weit über ausschließlich mit der Technologie assoziierte Eigenschaften hinausgehen (54 Prozent aller objektbezogenen Kommentare, s. Tab. 29.2) – solche Aussagen können gesellschaftliche Entwicklungen in einem eher allgemeinen Sinn betreffen, aber auch die künftige Entwicklung von Autonutzung und -besitz, das Design und die Ausstattung der Fahrzeuge, die Interaktion zwischen Mensch und Maschine oder auch Überlegungen zur zukünftigen Gestaltung von Verkehr und (städtischem) Raum. Ein User beschäftigt sich etwa mit den Folgen veränderter gesetzlicher Rahmenbedingungen: „Die Frage ist also nicht mehr: Wer haftet, wenn es Unfälle bei autonomen Autos gibt, sondern: Wer bekommt noch eine Erlaubnis, manuell zu fahren?“

Tab. 29.3 Aussagenverteilung für n = 516 auf einer affektiv-subjektiven Ebene

	D	USA	Heise online		D	USA	Heise online
<i>Codes/Ebenen</i>	<i>Nennung in %</i>			<i>Codes/Ebenen</i>	<i>Nennung in %</i>		
Bewertungen, Einstellungen, Erwartungen	86%	84%	78%	Motivation Auto-nutzung und -besitz	14%	16%	22%
<i>negativ</i>	48%	53%	37%	Allgemein	34%	27%	20%
Misstrauen, Skepsis	76%	67%	91%	Bezug zu autonomem Fahren	66%	73%	80%
Ablehnung	24%	33%	9%	- Pro auton. Fahren	48%	21%	25%
<i>positiv</i>	35%	35%	30%	- Contra auton. Fahren	43%	79%	25%
Optimismus, Vertrauen	55%	43%	44%	- Besitz, Carsharing	9%	0%	50%
vorstellbar, wünschenswert	35%	47%	41%				
grundsätzliches Interesse	10%	10%	15%				
<i>ambivalent</i>	17%	12%	33%				

29.4.2.2 Subjektbezogene Ebene

Bewertende Einstellungen und Erwartungen

Kommentare in den Online-Foren bestehen in der Regel aus mehreren Aussagen, die verschiedenen Ebenen oder (Sub-)Kategorien zugeordnet werden können – häufig sind dabei Aussagen auf der eher „sachlichen“ mit solchen auf der subjektiv-emotionalen Ebene verknüpft; wenn mit dem autonomen Fahrzeug z. B. negative Eigenschaften assoziiert werden, steht der Verfasser oder die Verfasserin des Kommentars der Nutzung der Technologie meist ebenfalls eher ablehnend gegenüber und vice versa. „Ich will nicht das Steuer aus der Hand geben! – und schon gar nicht an einen Computer, den man manipulieren und hacken kann, wie den PC und das Handy!“ verbindet in dieser Aussage Sicherheitsbefürchtungen (ein autonomes Fahrzeug wird, ähnlich einem Computer, möglicherweise nicht sicher sein, Daten könnten missbraucht werden) mit subjektiver Ablehnung. Andersherum kann etwa die Erwartung, dass autonome Fahrzeuge besonders komfortabel und flexibel sind, mit positiver persönlicher Bewertung der Technologie einhergehen: „Vollautomatisiertes Fahren ohne nervige Mitfahrer, ohne Zugausfälle und Verspätungen – wäre schon sehr cool“. Nicht immer sind Aussagen auf den unterschiedlichen Ebenen allerdings miteinander verknüpft; Bewertungen können z. B. auch ohne Angabe näherer Gründe vorgenommen werden, so wie diese aus US-amerikanischen Online-Portalen: „Yes. Easiest question I’ve been asked all day!“ oder „Jerry, I support you, but not on this“ („Jerry“ bezieht sich hier auf den Gouverneur von Kalifornien, Jerry Brown, der 2012 die Straßenzulassung der Google Driverless Cars medienwirksam im Google-Hauptquartier erteilte).

Generell wird die Technologie zwar deutlich *positiv wahrgenommen* (s. o. – „Wahrgenommene Eigenschaften und Folgen“), dabei aber eher ambivalent bis *negativ bewertet*

(über zwei Drittel aller Aussagen in dieser Kategorie sind nicht positiv konnotiert (s. Tab. 29.3), wobei sich Misstrauen und Skepsis entweder auf die technische Entwicklung, die Sinnhaftigkeit oder aber die Umsetzbarkeit und Machbarkeit der Technologie beziehen. In der Kategorie der ambivalenten Aussagen geht es vor allem um Voraussetzungen und Konsequenzen (auf technischer, gesellschaftlicher oder Infrastruktur-Seite), die als wesentlich identifiziert werden, bevor autonomes Fahren positiv bewertet werden könnte.

Autonutzung und -besitz

Die Wahrnehmung von autonomem Fahren ist stark mit subjektiven und persönlichen Motiven der eigenen Autonutzung verwoben. Die Analyse konnte hier zwei gegensätzliche Pole der Bewertung von autonomem Fahren identifizieren: Auf der einen Seite stehen Aussagen, in denen die Motivation zur Autonutzung aufgrund von Komfort und Flexibilität des Autos sowie aufgrund „allgemeiner“ Vorteile des motorisierten Individualverkehrs betont wurde. Solche Aussagen enthalten i. A. auch eine eher positive Einschätzung und Bewertung des autonomen Fahrens: „Das Auto hat doch vor allem diesen fast ubiquitären Charakter, weil es so praktisch ist. Ich fände es praktischer, wenn ich mir so ein auto-Auto online an meine Haustür sekundengenau ordern kann und mich vor jedem Ziel absetzen lassen kann, ohne mich um den Parkplatz zu kümmern. Wenn diese Zukunftsvision möglich wird: Goodbye Porsche.“ Auf der anderen Seite sind Aussagen, die Aspekte von Freiheit, Individualität, Kontrolle und den Spaß am Autofahren hervorheben, meist auch mit einer skeptischen bis ablehnenden Haltung gegenüber der neuen Technologie verknüpft: „Wo bleibt da der Spaß am Selbstfahren? Technik hin oder her: Ich möchte selbst bestimmen über mein Fahrzeug und kein Computer.“ Darüber hinaus thematisieren einige User ganz allgemein, welche Motive und Einstellungen der eigenen Autonutzung zugrunde liegen oder setzen sich mit der Frage auseinander, warum man in einer Zukunft mit autonomen Fahrzeugen das eigene Auto schließlich abschaffen würde (oder eben gerade nicht).

29.4.2.3 Vergleiche der Gruppen: Deutschland, USA und Heise online

Viele Wahrnehmungen, Einschätzungen, Perspektiven und Werthaltungen haben in allen drei Gruppen ähnliche Ergebnisse gezeigt, dennoch konnten in einigen Bereichen auch deutliche Unterschiede ausgemacht werden, die entweder länderspezifisch oder wissensspezifisch waren (für die Kommentare auf Heise online konnte angenommen werden, dass hier ein deutlich größeres Wissen zum Thema autonomes Fahren vorhanden war sowie ein größeres Verständnis von Technik und Technologie allgemein). Neben den bereits erwähnten Themen zu Haftung, Versicherung und Recht und zu Entwicklungsperspektiven, die als je gruppenspezifisch charakterisiert werden konnten, hat die Analyse auch gezeigt, dass US-amerikanische Kommentare im Vergleich zu ihren deutschen Pendanten deutlich häufiger eine stark gesellschaftspolitisch konnotierte Betrachtung des autonomen Fahrens vornehmen (s. Tab. 29.1). Darüber hinaus hat die Auswertung zu den Themen Autonutzung und -besitz gezeigt, dass auf US-amerikanischer Seite deutlich jene Kommentare überwiegen, bei denen Spaß, individuelle Freiheit und Steuerungskontrolle im Zentrum der Motivation zur Autonutzung stehen. Damit geht gleichzeitig meist eine ablehnende Haltung

gegenüber dem autonomen Fahren einher (79 Prozent in den USA gegenüber 43 Prozent bei den deutschen Massenmedien-Kommentaren und nur 25 Prozent bei den technologieaffinen Kommentaren).

Die Haftungsfragen wurden insgesamt bei Heise online am stärksten kontrovers diskutiert, während auf US-amerikanischer Seite in den wenigen Aussagen zu diesem Thema alle Schreibenden die Haftung künftig beim Hersteller sehen. Die Autoren von Kommentaren in der Gruppe von Spiegel Online und Co., also bei den deutschen Massenmedien, finden dagegen mehrheitlich (58 Prozent), dass auch in Zukunft die Haftung bei der Halterin oder dem Halter des Fahrzeugs liegen sollte.

Der Grundton der Kommentare auf den deutschen Portalen ist insgesamt etwas positiver: Sowohl auf Heise online als auch in den Foren der anderen Medienportale werden häufiger als auf den US-amerikanischen Medienportalen positive Eigenschaften des autonomen Fahrens thematisiert (70 Prozent und 71 Prozent gegenüber 61 Prozent) und gleichzeitig weniger negative Bewertungen vorgenommen (37 Prozent und 48 Prozent gegenüber 53 Prozent).

29.4.2.4 Zusammenfassung

In den US-amerikanischen ebenso wie in den deutschen Leser-Kommentaren, die auf den Massenmedien-Portalen verfügbar waren, überwiegen Aussagen, die derzeit noch stark an den erwarteten Eigenschaften der autonomen Fahrzeuge selbst orientiert sind. Das heißt, das Akzeptanzobjekt ist in der Tat das physische Objekt Auto und seine individuelle Nutzung. Auf Heise online stellt sich dies anders dar – die Diskussionen gehen bereits weit über die Orientierung am rein „Technischen“ hinaus und thematisieren konkrete Nutzungsszenarien bzw. sehen autonomes Fahren stärker in Zusammenhang mit dem gesamten sozio-technischen System der (Auto-)Mobilität. Da die meisten Schreibenden auf diesem Portal offensichtlich bereits über mehr Wissen in Bezug auf die Technologie verfügen als „normale“ Medienrezipienten, kann vermutet werden, dass mit dem Fortschreiten der öffentlichen Debatte zum autonomen Fahren (die ja erst im Laufe der letzten zwei Jahre an Fahrt aufgenommen hat) solche Themen an Relevanz gewinnen werden, die nicht nur die Technologie an sich betreffen, sondern auch ihre Einbettung in das System, also stärker den Akzeptanzkontext einbeziehen.

Insgesamt spannt die Untersuchung den derzeit gültigen „Akzeptanzraum“ zum Thema autonomes Fahren auf. Dieser Akzeptanzraum ergibt sich aus den Themen, die aktuell die über die Medien geführte Debatte in der Gesellschaft strukturieren und gleichzeitig mit spezifischen Wertungen verbunden sind. Betrachtet man die Breite an Themen, dann zeigt sich zwar, dass dem autonomen Fahrzeug überwiegend positive Eigenschaften zugewiesen, daneben allerdings auch negative Eigenschaften identifiziert werden. Darüber hinaus wird eine Reihe von Fragen aufgeworfen, die aus Sicht der Kommentierenden noch der Klärung bedürfen und – je nachdem, wie diese Klärung ausfällt – ebenfalls Einfluss auf die Akzeptanz haben werden. Die Ambivalenz, die darin zum Ausdruck kommt, setzt sich fort, wenn die Äußerungen auf der sachlich-objektbezogenen Ebene um die Aussagen auf der affektiv-subjektiven Ebene ergänzt werden: Während das autonome Fahrzeug als solches eine

vornehmlich positive Bewertung erfährt, gibt es doch gleichzeitig ein ausgeprägtes Misstrauen und eine deutliche Skepsis bis hin zur Ablehnung gegenüber dem autonomen Fahren und der Einführung von autonomen Fahrzeugen in das Verkehrssystem. Diese Einstellung ist besonders häufig mit der Angst vor negativen sozialen Folgen, aber auch vor dem Verlust von Freiheit assoziiert.

Eine solche ambivalente Haltung gegenüber autonomem Fahren ist allerdings typisch für die Einstellung gegenüber Technik – und spiegelt die Ergebnisse aus anderen Untersuchungen zur Technikakzeptanz (in Deutschland) wider [13]: Auf der einen Seite werden mit dem autonomen Fahren viele Vorteile assoziiert, die das Leben komfortabler machen können und neue Potenziale eröffnen. Auf der anderen Seite geht mit den erwarteten Veränderungen auch die Angst vor negativen gesellschaftlichen Konsequenzen einher, die sich im „... Verlust an Kontrolle der eigenen Lebenswelt und der eigenen Lebenszeit ...“ ([13], S. 33) äußern. Dieser ambivalenten Haltung liegt der Wunsch zugrunde, „... Lebenswelt und Technik miteinander in Einklang zu bringen und die soziale, wirtschaftliche und natürliche Umwelt für zukünftige Generationen funktionsfähig zu erhalten ...“ ([13], S. 33). In der Debatte um autonomes Fahren, das hat die Analyse gezeigt, geht es also nicht nur darum, den motorisierten Individualverkehr sicherer, komfortabler, flexibler, effizienter usw. zu machen, sondern auch darum, aufzuzeigen und zu reflektieren, welche gesellschaftlichen, sozialen und wirtschaftlichen Auswirkungen autonomes Fahren mit sich bringen würde.

29.5 Fazit und Ausblick

Akzeptanzforschung, so wurde im vorliegenden Beitrag argumentiert, muss über die reine Erforschung von Meinungen und Einstellungen hinausgehen. Sie soll vielmehr im Sinne einer „antizipierenden gesellschaftlichen Marktforschung“ ([11], S. 3) Bedarfe, Vorstellungen, Wünsche, Hoffnungen, Befürchtungen und Ängste identifizieren und in den Zusammenhang eines sozio-technischen Systems – in diesem Fall des Verkehrssystems als Teil des gesamtgesellschaftlichen Systems – und seiner Entwicklung einordnen. Auf diese Weise können Potenziale und Optionen aufeinander abgestimmt werden (vgl. [40]). Ein komplexes Thema wie autonomes Fahren berührt unterschiedliche Bereiche unserer Gesellschaft, weshalb eine interdisziplinäre Zusammenarbeit wie im Projekt „Villa Ladenburg“ der Daimler und Benz Stiftung, das die Beiträge des vorliegenden Bandes initiiert und zusammengeführt hat, unumgänglich ist.

Künftige Untersuchungen zur Akzeptanz autonomen Fahrens sollten sowohl einen stärkeren Fokus auf kultur-, typen- und milieuspezifische Unterschiede der Akzeptanz als auch auf die Interdependenzen von Themenbereichen legen. Die Auswertung der Online-Kommentare hat hierzu erste wichtige Erkenntnisse geliefert und weist den Weg für künftige Erhebungen: Die ambivalenten Ergebnisse in Bezug auf die Motivation zur Autonutzung müssen genauer in den Blick genommen werden, um auf diese Weise einordnen zu können, welche individuelle, aber auch gesellschaftliche Bedeutung Autonutzung und -besitz heute hat, welche symbolischen, emotionalen und instrumentellen Eigenschaften

dem autonomen Fahrzeug zugeschrieben werden und welchen Einfluss auf die Akzeptanz von autonomem Fahren die aktuelle Autonutzung und der Autobesitz erwarten lassen. Kapitel 31 befasst sich insbesondere mit diesen Fragen.

Derzeit ist zumindest in der öffentlichen Debatte häufig noch gar nicht klar, worum es eigentlich geht, wenn vom autonomen Fahren die Rede ist – dies gilt sowohl für die mediale Rezeption der Technologie als auch deren Darstellung. Ist die Rede von autonomen (Privat-)Fahrzeugen, die der Fahrerin oder dem Fahrer dann und wann die Fahraufgabe abnehmen können? Oder geht es um fahrerlose Taxis, die, sozusagen „auf Kommando“, sowohl Personen als auch Güter jederzeit überallhin transportieren können? Gegenwärtig ist davon auszugehen, das hat auch die Auswertung gezeigt, dass viele Fragen, die mit einer möglichen künftigen Implementation autonomer Fahrzeuge in unser Verkehrssystem einhergehen, noch ungeklärt sind. Damit entzieht sich allerdings auch die Frage nach dem Nutzen von autonomem Fahren – sowohl auf individueller als auch auf gesellschaftlicher Ebene – einer eindeutigen Antwort. Momentan ist nur zu erahnen, welche Wertzuordnungen beim autonomen Fahren die wichtigsten Rollen einnehmen, auch wenn die vorliegende Untersuchung zumindest einen Einblick in die relevanten Themen geben konnte, die mit der Technologie assoziiert werden: Sicherheit, Komfort, Kostenersparnis, Umweltverträglichkeit, Zeitersparnis, Chancengleichheit etc.

Darüber hinaus ist der weiter oben beschriebene Kontext der Akzeptanz bzw. des autonomen Fahrens von zentraler Bedeutung für künftige Untersuchungen. Diesen Schluss lassen u. a. auch die Ergebnisse aus den US-amerikanischen Kommentaren mit stärker gesellschaftspolitisch konnotierten Aussagen zu: Hier scheint, aus Sicht der Kommentierenden, das autonome Fahren möglicherweise mit dem derzeit vorherrschenden Normen- und Wertesystem der Autonutzung zu kollidieren. Künftige Studien sollten deshalb die individuelle und gesellschaftliche Bedeutung der heutigen Autonutzung in den Blick nehmen und konkret danach fragen, wie diese in den Kontext von Alltagspraxis und kultur- bzw. milieuspezifischen Orientierungsrahmen eingebettet ist (s. hierzu auch Kap. 31). Darüber kann bestimmt werden, welche konkreten Aspekte in diesem Zusammenhang Auswirkungen auf die Akzeptanz des autonomen Fahrens erwarten lassen.

Im Sinne einer konkreteren Nutzenbestimmung bzw. Wertzuordnung wird es künftig auch darum gehen, Technologie für potenzielle Nutzerinnen und Nutzer oder Betroffene erfahrbar zu machen und eine Vorstellung davon zu ermöglichen, was von ihr erwartet werden, aber auch, was sie nicht leisten kann. In diesem Sinne könnten vor allem politische bzw. öffentliche Institutionen akzeptanz- oder zumindest zugangsfördernd wirken ([3], S. 3), indem sie die öffentliche Debatte stärker mitprägen oder konkrete Test- und Pilotprojekte für autonomes Fahren initiieren – zu den aktuellen Bestrebungen und Bemühungen von Seiten der Politik s. Kap. 8. An anderer Stelle im Projekt wurde bereits deutlich, dass spezifische Anwendungsfälle des autonomen Fahrens, wie sie über die Use-Cases (s. Kap. 2) eingeführt wurden, jeweils spezifische Bewertungen, Erwartungen und Einschätzungen mit sich bringen (s. Kap. 31 zum Thema Autonutzung und -besitz im Zusammenhang mit autonomem Fahren sowie auch Kap. 6, Kap. 12 und Kap. 33).

Literatur

1. Continental AG: Continental Mobilitätsstudie 2013. [http://www.continental-corporation.com/www/download/pressportal_com_en/\(general/ov_automated_driving_en/ov_mobility_study_en/download_channel/pres_mobility_study_en.pdf](http://www.continental-corporation.com/www/download/pressportal_com_en/(general/ov_automated_driving_en/ov_mobility_study_en/download_channel/pres_mobility_study_en.pdf). (2013). Zugegriffen: 30. September 2014
2. Khan, A. M., Bacchus, A., Erwin, S.: Policy challenges of increasing automation in driving. *IATSS Research*. 35, 79–89 (2011)
3. Rupp, J. D., King, A. G.: Autonomous Driving – A Practical Roadmap. SAE International. <http://www.fujitsu.com/downloads/MICRO/fma/marcom/convergence/data/papers/2010-01-2335.pdf> (2010). Zugegriffen: 30. September 2014
4. Drosdowski, G.: Duden. Das große Wörterbuch der deutschen Sprache. Bd. 1., A-Bim. Dudenverlag, Mannheim (1993)
5. Hasse, M.: Know-how ohne Know why: Das Internet als virtuelles Akzeptanzobjekt. In: Lucke, D., Hasse, M. (Hrsg.) *Annahme verweigert: Beiträge zur soziologischen Akzeptanzforschung*, S. 187–213. Springer Fachmedien, Wiesbaden (1998)
6. Schäfer, M., Keppler, D.: Modelle der technikorientierten Akzeptanzforschung. Überblick und Reflexion am Beispiel eines Forschungsprojekts zur Implementierung innovativer technischer Energieeffizienz-Maßnahmen. Discussion Paper. Zentrum Technik und Gesellschaft, Berlin http://www.tu-berlin.de/fileadmin/f27/PDFs/Discussion_Papers/Akzeptanzpaper__end.pdf (2013). Zugegriffen: 30. September 2014
7. Grunwald, A.: Zur Rolle von Akzeptanz und Akzeptabilität von Technik bei der Bewältigung von Technikkonflikten. *Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis*. 14 (3), 54–60 (2005)
8. Geels, F.: Technological transitions and system innovations, A Co-Evolutionary and Socio-Technical Analysis. Cheltenham: Edward Elgar, Cheltenham (2005)
9. Acatech: Akzeptanz von Technik und Infrastrukturen: Anmerkungen zu einem aktuellen gesellschaftlichen Problem (acatech bezieht Position). Springer-Verlag, Wiesbaden (2011)
10. Petermann, T., Scherz, C.: TA und (Technik-)Akzeptanz(-forschung). *Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis*. 14, 45–53 (2005)
11. Hüsing, B., Bierhals, R., Bühlren, B., Friedewald, M., Kimpeler, S., Menrad, K., Zoche, P.: Technikakzeptanz und Nachfragemuster als Standortvorteil. Fraunhofer ISI, Karlsruhe (2002)
12. Lucke, D.: Akzeptanz: Legitimität in der „Abstimmungsgesellschaft“. Leske + Budrich, Opladen (1995)
13. Renn, O.: Technikakzeptanz: Lehren und Rückschlüsse der Akzeptanzforschung für die Bewältigung des technischen Wandels. *Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis*. 14, 29–38 (2005)
14. Dethloff, C.: Akzeptanz und Nicht-Akzeptanz von technischen Produktinnovationen. Dissertation, Universität zu Köln (2004)
15. Schweizer-Ries, P., Rau, I., Zoellner, J., Nolting, K., Rupp, J., Keppler, D.: Aktivität und Teilhabe – Akzeptanz Erneuerbarer Energien durch Beteiligung steigern. Projektabschlussbericht, Magdeburg & Berlin (2010)
16. Hampel, J.; Renn, O.: Technikakzeptanz und Kontroversen über Technik. Bericht für das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB). Stuttgart: Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg (2002)
17. AutoScout24 GmbH: Unser Auto von morgen 2013/14 <http://ww2.autoscout24.de/special/unsere-auto-von-morgen--2013-14/was-wuenschen-sichdie-europaeer-vom-auto-von-morgen/4319/392974/> (2013). Zugegriffen: 30. September 2014
18. AutoScout24 GmbH: Unser Auto von morgen. Studie zu den Wünschen der Europäer an das Auto von morgen about.autoscout24.com/de-de/au-press/2012_as24_studie_auto_v_morgen_en.pdf. (2012). Zugegriffen: 30. September 2014

19. Peters, A., Dütschke, E.: Zur Nutzerakzeptanz von Elektromobilität – Analyse aus Expertensicht. Fraunhofer ISI, Karlsruhe (2010)
20. Frost & Sullivan: Customer Desirability and Willingness to Pay Active and Passive Safety Systems in Canada. Frost & Sullivan, Canada (2006)
21. Deloitte: Third Annual Deloitte Automotive Generation Y Survey “Gaining speed: Gen Y in the Driver’s Seat”. Deloitte Development LLC http://www.deloitte.com/assets/Dcom-UnitedStates/Local%20Assets/Documents/us_automotive_2011%20Deloitte%20Automotive%20Gen%20Y%20Survey%20FACT%20SHEET_012011.pdf (2011). Zugegriffen: 30. September 2014
22. Dreesen, P., Kumięga, Ł., Spieß, C. (Hrsg.): Mediendiskursanalyse. Diskurse – Dispositive – Medien – Macht. VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden (2012)
23. Anonymous.: Freie Fahrt für Googles Roboter-Autos. BILD.de www.bild.de/digital/multimedia/google/google-auto-darf-fahren-26404736.bild.html (2012). Zugegriffen: 30. September 2014
24. Doll, N.: Selbstlenkendes Auto kommt schneller als man denkt. Die Welt. www.welt.de/wirtschaft/article109473825/Selbstlenkendes-Auto-kommt-schneller-als-man-denkt.html#disqus_thread. (2012). Zugegriffen: 30. September 2014
25. Anonymous.: Kalifornien lässt fahrerlose Autos im Straßenverkehr zu. Frankfurter Allgemeine Zeitung. www.faz.net/aktuell/technik-motor/google-auto-kalifornien-laesst-fahrerlose-autos-im-strassenverkehr-zu-11904259.html. (2012). Zugegriffen: 30. September 2014
26. Wilkens, A.: Bosch: Selbstfahrende Autos brauchen noch mindestens zehn Jahre. Heise online. <http://www.heise.de/newsticker/meldung/Bosch-Selbstfahrende-Autos-brauchen-noch-mindestens-zehn-Jahre-1778920.html> (2013). Zugegriffen: 30. September 2014
27. Hengstenberg, M.: Automatisiertes Fahren: Kein Mensch am Steuer? Ungeheuer!. Spiegel Online. www.spiegel.de/auto/aktuell/automatisiertes-fahren-2025-fahren-autos-selbststaendig-a-873582.html (2012). Zugegriffen: 30. September 2014
28. Büttner, R.: Neues Gesetz in den USA: Kalifornien lässt autonome Pkw auf die Straßen. Spiegel Online. www.spiegel.de/auto/aktuell/neues-gesetz-in-kalifornien-duerfen-autonome-auto-auf-die-strassen-a-857988.html (2012). Zugegriffen: 30. September 2014
29. Kröger, M.: Autonomes Fahren: Google-Auto erhält Straßenzulassung. Spiegel Online. www.spiegel.de/auto/aktuell/google-strassenzulassung-fuer-autonomes-auto-a-831920.html (2012). Zugegriffen: 30. September 2014
30. Crocoll, S.: Hilf mir, Kumpel. Süddeutsche.de. www.sueddeutsche.de/auto/autos-die-sich-selbst-steuern-hilf-mir-kumpel-1.1479826 (2012). Zugegriffen: 30. September 2014
31. Biermann, K.: Google: Kalifornien lässt autonome Autos auf die Straße. Zeit Online. www.zeit.de/digital/mobil/2012-09/google-autonome-autos (2012). Zugegriffen: 30. September 2014
32. Schaefer, S.: Talk Back: Should California allow self-driving cars? Los Angeles Times. latimesblogs.latimes.com/lanow/2012/09/talk-back-california-self-driving-cars.html (2012). Zugegriffen: 30. September 2014
33. Anonymous.: Google’s self-driving cars get license for test drive in Nevada. New York Daily News. www.nydailynews.com/news/national/google-self-driving-cars-license-test-drive-nevada-article-1.1073991 (2012). Zugegriffen: 30. September 2014
34. Cain Miller, C.: With a Push From Google, California Legalizes Driverless Cars. New York Times. bits.blogs.nytimes.com/2012/09/25/with-a-push-from-google-california-legalizes-driverless-cars/ (2012). Zugegriffen: 30. September 2014
35. Temple, J.: Calif. gives driverless cars go-ahead. San Francisco Chronicle. www.sfgate.com/technology/dotcommentary/article/Calif-gives-driverless-cars-go-ahead-3894339.php#page-1 (2012). Zugegriffen: 30. September 2014
36. Neil, D.: Who’s Behind the Wheel? Nobody. The Wall Street Journal. online.wsj.com/article/SB10000872396390443524904577651552635911824.html?KEYWORDS=autonomous+driving# (2012). Zugegriffen: 30. September 2014

37. Kolawole, E.: A win for Google's driverless car: Calif. governor signs a bill regulating autonomous vehicles, Washington Post. www.washingtonpost.com/blogs/innovations/post/a-win-for-googles-driverless-car-calif-governor-signs-a-bill-regulating-autonomous-vehicles/2012/09/25/77bd3652-0748-11e2-a10c-fa5a255a9258_blog.html (2012). Zugegriffen: 30. September 2014
38. Bohnsack, R., Marotzki, W., Meuser, M.: Hauptbegriffe Qualitativer Sozialforschung. 3. Aufl. Opladen & Farmington Hills: Verlag Barbara Budrich (2011)
39. Mayring, P.: Qualitative Inhaltsanalyse: Grundlagen und Techniken. Beltz Verlag, Weinheim (2010)
40. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF): Innovations- und Technikanalyse. Zukunftschancen erkennen und realisieren. Bonn: Bundesministerium für Bildung und Forschung (2001)
41. Hey, A.J.G., Walters, P.: The New Quantum Universe. University Press, Cambridge (2003)

Gesellschaftliche Risikokonstellation für autonomes Fahren – Analyse, Einordnung und Bewertung

30

Armin Grunwald

Inhaltsverzeichnis

30.1 Einleitung	662
30.2 Risikoanalyse und Risikoethik	663
30.2.1 Risiko – begriffliche Dimensionen	663
30.2.2 Konstellationsanalyse für Risiken	665
30.3 Gesellschaftliche Risikokonstellationen für autonomes Fahren	666
30.3.1 Risikokonstellation Unfall	666
30.3.2 Risikokonstellation Verkehrssystem	668
30.3.3 Risikokonstellation Investitionen	669
30.3.4 Risikokonstellation Arbeitsmarkt	670
30.3.5 Risikokonstellation Zugangsgerechtigkeit	671
30.3.6 Risikokonstellation Privatheit	672
30.3.7 Risikokonstellation Abhängigkeit	673
30.3.8 Zum Verhältnis von Risikokonstellation und Einführungsszenario	674
30.4 Einordnung in bisherige Risikodebatten	675
30.4.1 Erfahrungen aus den großen Risikodebatten	675
30.4.2 Schlussfolgerungen für das autonome Fahren	678
30.5 Fazit	679
30.5.1 Risikobewertung	679
30.5.2 Risiko und Akzeptanz	680
30.5.3 Elemente des gesellschaftlichen Risikomanagements	682
Literatur	684

A. Grunwald (✉)

Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS), Karlsruher Institut
für Technologie – KIT – Campus Nord, Deutschland
armin.grunwald@kit.edu

30.1 Einleitung

Der technische Fortschritt verändert die gesellschaftlichen Risikokonstellationen. Vielfach kommt es zu deutlich höherer Sicherheit und entsprechend positiven Folgen wie Gesundheit, längerer Lebenserwartung und größerem Wohlstand. Die Neuheit technischer Innovationen bringt jedoch zwangsläufig häufig auch nicht intendierte und nicht vorhergesehene Folgen mit sich, darunter auch neue Risikotypen. Aufgabe der Technikfolgenabschätzung ist es, neben den Innovationspotenzialen auch frühzeitig mögliche Risiken zu untersuchen und dadurch zu einer vernünftigen Abwägung und Entscheidungsfindung beizutragen [10].

Das autonome Fahren stellt in vieler Hinsicht eine attraktive Innovation für die Zukunft der Mobilität dar. Mehr Sicherheit, ein Gewinn an Komfort, die Nutzung der für das Fahren benötigten Zeit für andere Zwecke und Effizienzgewinne auf Systemebene gehören zu den vielfach erwarteten Vorteilen [4]. In Systemen und Technologien autonomen Fahrens sind jedoch – wie ganz grundsätzlich bei Technik – Fehler nicht auszuschließen, die zu Unfällen mit Sach- oder Personenschäden führen können. Die zentrale Rolle von Software kann zu systemischen Risiken führen, wie aus der Internet- und Computerwelt hinlänglich bekannt. Auch an ökonomische Risiken ist zu denken, z.B. für die Automobilindustrie, genauso wie an soziale Risiken etwa im privaten Bereich. Frühzeitige und umfassende Analyse und Bewertung möglicher Risiken des autonomen Fahrens sind unabdingbarer Bestandteil eines verantwortlichen Forschungs- und Innovationsprozesses und damit gleichermaßen notwendige Bedingungen einer individuellen wie auch allgemeinen gesellschaftlichen Akzeptanz. Vor diesem Hintergrund sollen in diesem Kapitel Antworten auf folgende Fragen gegeben werden, wie sie spezifisch für die Technikfolgenabschätzung sind:

- Welche spezifische gesellschaftliche Risikokonstellation liegt beim autonomen Fahren vor? Wer könnte durch welche Schäden und mit welcher Wahrscheinlichkeit betroffen sein?
- Was kann aus den bisherigen Erfahrungen mit Risikodebatten zum technischen Fortschritt für Entwicklung und Einsatz des autonomen Fahrens gelernt werden?
- Wie kann das gesellschaftliche Risiko für die Herstellung und den Betrieb von autonomen Fahrzeugen nachvollziehbar bewertet und verantwortlich organisiert werden?

Antworten auf diese Fragen sollen vor allem das Augenmerk auf möglicherweise problematische Entwicklungen lenken, um sie gegebenenfalls in Designentscheidungen oder Regulierungen berücksichtigen zu können, und damit zur verantwortlichen und transparenten Organisation des gesellschaftlichen Risikos beitragen.

30.2 Risikoanalyse und Risikoethik

Als Risiken bezeichnen wir mögliche Schäden, die als Folgen menschlichen Handelns und Entscheidens auftreten können. Oft sind wir aus unterschiedlichen Gründen bereit, sie in Kauf zu nehmen, z. B. weil wir das Eintreten des Schadensfalles für sehr unwahrscheinlich halten oder weil wir von der Entscheidung einen Nutzen erwarten, der größer ist als der mögliche Schaden im Falle seines Eintretens. Unter Umständen werden wir aber auch Risiken durch Entscheidungen anderer ausgesetzt, z. B. durch das Fahrverhalten anderer Autofahrer oder durch politische bzw. behördliche Entscheidungen in Standortfragen.

30.2.1 Risiko – begriffliche Dimensionen

Risiken enthalten drei zentrale semantische Elemente: das Moment der *Unsicherheit*, da das Eintreten möglicher Schäden nicht sicher ist, das Moment des *Unerwünschten*, denn Schäden sind nie willkommen, und das *soziale Moment*, weil sowohl Chancen als auch Risiken grundsätzlich verteilt sind und immer Chancen und Risiken für *bestimmte* Personen oder Gruppen sind.

Das Moment der *Unsicherheit* führt auf die erkenntnistheoretische Seite des Risikos: Was wissen wir über mögliche Schäden als Folgen unseres Handelns, und wie belastbar ist dieses Wissen? Diese Frage umfasst zwei Teilfragen:

1. Welche und wie große Schäden können als Folgen des Handelns und Entscheidens eintreten und
2. mit welcher Plausibilität oder Wahrscheinlichkeit ist mit ihrem Eintreten zu rechnen?

Zu beiden Fragen kann die Spannweite des verfügbaren Wissens von wissenschaftlich gesicherter und in Zahlen genau erfassbarer Kenntnis bis zu bloßen Vermutungen und Spekulationen reichen. Wenn sich Eintrittswahrscheinlichkeit und erwartete Schadensgröße quantitativ angeben lassen, wird ihr Produkt häufig als „objektives“ Risiko bezeichnet und z. B. in der Versicherungswirtschaft verwendet. Anderenfalls spricht man von „subjektiv“ eingeschätzten Risiken, z. B. aufgrund der Risikowahrnehmung unter bestimmten Personengruppen. Dazwischen befindet sich ein weites Feld mit vielfältigen Zwischentönen unter Plausibilitätserwägungen.

Das Moment des *Unerwünschten* ist zumindest im gesellschaftlichen Bereich semantisch untrennbar mit dem Risikobegriff verbunden: Risiken sind als mögliche Schäden per se unerwünscht.¹ Allerdings kann die Bewertung von möglichen Folgen des Handelns als Risiko oder als Chance umstritten sein [1]. Ein Beispiel ist, ob die Grüne Gentechnik

¹ In anderen Bereichen ist das nicht immer so. Beispielsweise gilt Risikofreudigkeit in manchen Führungspositionen als Stärke, und in Freizeitbeschäftigungen wie bei Computerspielen oder im Sport wird oft bewusst das Risiko gesucht.

vorrangig als Chance zur Sicherung der Welternährung oder als Risiko für Mensch und Umwelt gesehen wird. Die Einschätzung hängt von der erwarteten oder vermuteten Betroffenheit von den Folgen ab, was in Kombination mit der Unsicherheit dieser Folgen Freiraum für Interpretationen lässt – und damit zu Kontroversen geradezu einlädt.

Schließlich haben Risiken also eine *soziale Dimension*: Sie sind immer Risiken für jemanden. Häufig sind Chancen und Risiken auf verschiedene Personengruppen unterschiedlich verteilt. Im Extremfall sind die Nutznießenden von möglichen Schäden gar nicht betroffen, während die Träger der Risiken nicht an den erwarteten Chancen teilhaben. Es darf also bei Abwägungen von Chancen und Risiken nicht nur nach einer abstrakten Methode wie etwa der Kosten-Nutzen-Analyse auf volkswirtschaftlicher Ebene vorgegangen werden, sondern es muss auch gefragt werden, wer von den Chancen und Risiken wie betroffen ist und ob die Verteilung gerecht ist (s. Kap. 27).

Risiken als nicht intendierte Folgen von Handlungen und Entscheidungen nehmen wir entweder in Kauf oder muten sie anderen Menschen zu [15] bzw. wir setzen Objekte (wie z. B. Elemente der natürlichen Umwelt) Risiken aus. Unter einer *gesellschaftlichen Risikokonstellation* verstehen wir das Verhältnis von Personengruppen wie Entscheidenden, Regulierenden, Stakeholdern, Betroffenen, Beratenden, Politikern und Teilhabenden angesichts von häufig kontroversen Diagnosen erwarteter Vorteile und befürchteter Risiken. Die Beschreibung von gesellschaftlichen Risikokonstellationen des autonomen Fahrens ist das Hauptziel dieses Kapitels. Zentral ist die Unterscheidung nach einer aktiven und einer passiven Konfrontation mit Risiken des autonomen Fahrens:

1. *Aktiv*: Menschen gehen in ihrem Handeln Risiken ein, sie nehmen sie individuell oder kollektiv, bewusst oder unbewusst auf sich. Wer Entscheidungen trifft und handelt, riskiert häufig etwas für sich selbst. Ein Automobilkonzern, der auf autonomes Fahren als zukünftiges Geschäftsfeld setzt und massiv investiert, riskiert eine Fehlinvestition. Den Schaden hätte vor allem der Konzern selbst (Aktionär, Belegschaft).
2. *Passiv*: Menschen werden Risiken durch Entscheidungen anderer Menschen ausgesetzt. Die Betroffenen sind andere als die Entscheidenden. Ein riskant fahrender Autofahrer gefährdet neben seiner eigenen Gesundheit auch Leben und Gesundheit anderer.

Zwischen diesen Extremen lassen sich analytisch folgende Risikostufen unterscheiden:

1. *Risiken, über deren Eingehen individuell entschieden werden kann* wie Motorradfahren, Risikosportarten oder vielleicht zukünftig eine Urlaubsreise in den Weltraum;
2. *zugemutete Risiken, denen individuell relativ einfach ausgewichen werden kann* wie z. B. mögliche gesundheitliche Risiken durch Nahrungsmittelzusätze, die im Falle entsprechender Kennzeichnung durch den Kauf anderer Lebensmittel umgangen werden können;
3. *zugemutete Risiken, denen man nur mit erheblichem Aufwand ausweichen kann*, z. B. im Fall von Standortentscheidungen von Müllverbrennungsanlagen, radioaktiven

- Endlagern oder Chemiefabriken – man kann ja theoretisch einen anderen Wohnort suchen, jedoch in der Regel nur unter erheblichen Belastungen; und
4. *zugemutete Risiken ohne Ausweichmöglichkeit* wie Ozonloch, schleichende Grundwasserverschmutzung, Degradierung von Böden, Akkumulation von Schadstoffen in der Nahrungsmittelkette, Lärm, Feinstaubbelastung etc.

Die zentrale risikoethische Frage ist, unter welchen Bedingungen das Eingehen von Risiken (im aktiven Fall) bzw. ihre Zumutung (im passiven Fall) gerechtfertigt werden kann [11]. Häufig wird zwischen der faktischen *Akzeptanz* von Risiken und der normativ erwarteten *Akzeptanz*, der sogenannten *Akzeptabilität*, unterschieden [8]. Während die Akzeptanz im individuellen Ermessen liegt, wirft die Akzeptabilität ethische Fragen auf: Warum und unter welchen Bedingungen darf man andere Menschen Risiken aussetzen (s. Kap. 4)? Verschärft stellt sich diese Frage, wenn die möglicherweise Betroffenen von den Risiken weder in Kenntnis gesetzt wurden noch ihre Zustimmung erklären konnten, z. B. im Fall von Risiken für zukünftige Generationen. Aufgabe der Risikoethik [11] ist die normative Beurteilung der Akzeptabilität und Verantwortbarkeit von Risiken in Ansehung der empirischen Erkenntnisse über Schadensart, Schadensgröße, Eintrittswahrscheinlichkeit und Resilienz (Widerstandsfähigkeit) und bezogen auf eine spezifische Risikokonstellation.²

30.2.2 Konstellationsanalyse für Risiken

Also sind verbreitete Fragen des Typs, wie groß das Risiko bestimmter Maßnahmen oder neuer Technologien sei, zu pauschal und verdecken die vielfältigen Differenzierungen. Eine adäquate und sorgfältige Diskussion von Risiken muss kontextbezogen und differenzierend vorgehen und soll in Bezug auf das autonome Fahren folgende Fragen so weit wie möglich beantworten:

- Für wen können Schäden auftreten, welche Personengruppen können gefährdet werden oder müssten möglicherweise Nachteile erleiden?
- Wie sind mögliche Risiken auf Personengruppen verteilt? Sind die Träger der Risiken andere Gruppen als die Nutzer der Vorteile des autonomen Fahrens?
- Wer sind jeweils die Entscheider? Befinden sie über selbst einzugehende Risiken, oder setzen sie andere Menschen Risiken aus?
- Welche Arten von Schäden sind vorstellbar (Gesundheit/Leben von Menschen, Sachschäden, Arbeitsplatzeffekte, Reputation von Unternehmen etc.)?
- Mit welcher Plausibilität oder Wahrscheinlichkeit ist mit dem Eintreten dieser Risiken zu rechnen? Wovon hängt ihr Eintreten ab?

² Die Ergebnisse von Fraedrich und Lenz [6] zeigen, dass potenzielle Nutzerinnen und Nutzer sich nicht nur Gedanken um individuelle, sondern auch um gesellschaftliche Risiken machen.

- Wie groß ist die räumliche und zeitliche Reichweite möglicher Risiken des autonomen Fahrens? Gibt es indirekte Risiken, z. B. über systemische Effekte?
- Welche Akteure sind an der Risikoanalyse, der Risikokommunikation und der Bewertung der Risiken beteiligt, und welche Perspektiven bringen sie ein?
- Was wissen wir über diese Konstellationen, mit welcher Verlässlichkeit wissen wir dies, welche Unsicherheiten sind involviert, und welche sind möglicherweise nicht eliminierbar?

Auf diese Weise wird das *abstrakte* Risiko in eine mehr oder weniger große Vielzahl von klar angebbaren Risiken in präzisen Konstellationen zerlegt, über deren Legitimierung und Verantwortbarkeit dann einzeln und konkret gesprochen werden kann. Es werden mögliche gesellschaftliche Risiken des autonomen Fahrens „vermessen“ – man könnte sagen, dass eine „Landkarte“ dieser Risiken entsteht, die einen ersten Schritt zum Verständnis der Gesamtrisikosituation in diesem Feld bildet. Unterschiedliche Konstellationen involvieren unterschiedliche Legitimationserwartungen und verschiedene ethische Aspekte, z. B. im Hinblick auf Informations- und Mitbestimmungsrechte [11], [15], aber auch unterschiedliche Maßnahmen im gesellschaftlichen Umgang mit diesen Risiken.

30.3 Gesellschaftliche Risikokonstellationen für autonomes Fahren

Gesellschaftliche Risikokonstellationen für autonomes Fahren umfassen unterschiedliche Aspekte möglicher Schäden und Nachteile, unterschiedliche soziale Dimensionen und verschiedene Grade der Plausibilität des Eintretens möglicher Schäden.

30.3.1 Risikokonstellation Unfall

Zu den vom autonomen Fahren erwarteten Vorteilen gehört eine starke Verringerung der Zahl der Verkehrsunfälle und der damit verbundenen Schäden für Leben, Gesundheit und Werte [4] (s. Kap. 17). Diese Reduktion ist ein starkes ethisches Anliegen [3]. Dennoch ist nicht auszuschließen, dass es aufgrund technologischer Mängel oder in Situationen, auf die die Technologie nicht vorbereitet ist, zu Unfällen kommen kann, die spezifisch für autonomes Fahren sind und die vermutlich mit einem menschlichen Fahrer nicht eingetreten wären. Ein Beispiel hierfür könnten unvorhergesehene und von der Automatik nicht handhabbare Situationen beim Valet-Parken (s. Kap. 2) sein. Auch wenn es hierbei nur zu Blechschaden käme, wäre eine klare rechtliche und finanzielle Nachbearbeitung erforderlich. Diese wäre umso komplexer, je weitreichender die Unfallfolgen wären, z. B. im Falle eines schweren Unfalls mit einem automatischen Autobahnpiloten (s. Kap. 2).

Mit Autounfällen sind wir aus dem seit über hundert Jahren etablierten Straßenverkehr sehr gut vertraut. Sie involvieren nur ein oder wenige Fahrzeuge, führen zu Schäden bei

einer begrenzten Anzahl von Menschen und haben ökonomisch begrenzte Auswirkungen. Für diesen Risikotypus kleinräumiger Unfälle ist ein umfangreiches und ausgereiftes System aus Rettungskräften, Unfallmedizin, Haftungsrecht und Versicherungen etabliert. Individuelle Unfälle verursacht durch autonome Fahrzeuge können voraussichtlich weitgehend innerhalb des bestehenden Systems behandelt werden. Allerdings ist die erforderliche Weiterentwicklung rechtlicher Rahmenbedingungen keine triviale Aufgabe (vgl. [7]).

Unfallrisiken dieser Art sind zum einen die Nutzerinnen und Nutzer autonomer Fahrzeuge *als Insassen* ausgesetzt. Dabei entscheiden sie selbst, ob sie sich diesen Risiken aussetzen wollen oder nicht, also durch Nutzung eines autonomen Fahrzeugs oder durch Verzicht. Durch Unfallrisiken des autonomen Fahrens können aber auch andere Verkehrsteilnehmer und -teilnehmerinnen gefährdet werden, selbstverständlich auch solche, die sich nicht am autonomen Fahren beteiligen. Diesen Risiken kann man sich theoretisch dadurch entziehen, dass man nicht am Straßenverkehr teilnimmt – das wäre jedoch mit erheblichen Einschränkungen verbunden. Von daher handelt es sich beim Umgang mit Risiken des autonomen Fahrens um ein komplexes Aushandlungs- und Regulierungsthema (s. Kap. 25), in dem nicht nur das Markt-, sprich Kaufverhalten, entscheidend, sondern auch Gemeinwohlfragen wie eine mögliche Gefährdung anderer bzw. deren Schutz zu thematisieren sind. Hierfür bedarf es demokratisch und rechtlich abgesicherter Verfahren (Zulassungsverfahren, Behörden, Überprüfungen, Straßenverkehrsordnung, Produkthaftung etc.).

Diese Risiken und auch ihre komplizierte Verteilung sind nicht neu, sondern als tägliche Praxis im Straßenverkehr omnipräsent und gesellschaftlich auch akzeptiert. Dass beispielsweise gegenwärtig in Deutschland jährlich über 3000 Verkehrstote zu beklagen sind, führt nicht zu Protesten, Ablehnung des Autoverkehrs oder massivem Druck zu Veränderungen. Letzteres war anders in den frühen 1970er-Jahren, als es allein in Westdeutschland bei nur etwa einem Zehntel des heutigen Verkehrsaufkommens zu über 20.000 Verkehrstoten jährlich kam. Es wurden Maßnahmen ergriffen, vor allem zur Steigerung passiver Sicherheit, die zu einer deutlichen Verringerung dieser Todesraten geführt haben. Entscheidend für einen gesellschaftlichen Risikovergleich des bisherigen Systems mit einem zukünftigen System unter Einbezug des autonomen Fahrens wird sein, dass die Gesamtzahl der Verkehrsunfälle und der dadurch bedingten Schäden deutlich reduziert wird (s. Kap. 17 und Kap. 21). Die Tatsache, dass das autonome Fahren kaum schlagartig das heutige System ablösen wird, sondern voraussichtlich allmählich in das Verkehrssystem integriert werden wird, ist vor diesem Hintergrund ambivalent. Denn einerseits sind Mischsysteme mit menschlichen Fahrern und autonom geführten Fahrzeugen vermutlich von einer erheblich höheren Komplexität und Unvorhersehbarkeit als ein komplett auf autonomes Fahren umgestelltes System. Andererseits jedoch bietet die allmähliche Durchdringung des Verkehrssystems die Chance des Lernens aus eingetretenen Schadensfällen mit der Möglichkeit der Verbesserung. Dem Monitoring der Schadensfälle und der Ursachenanalyse kommt dabei höchste Bedeutung zu (s. Kap. 21).

Wenn die Erwartung zutrifft, dass menschenverursachte Unfälle durch autonomes Fahren stark zurückgehen, wird dem Haftungsrecht zusätzliche Bedeutung zuwachsen,

denn dann steigt der Anteil (nicht unbedingt die absolute Zahl) der technikverursachten Unfälle.³ Während heute die Verursacher zumeist Menschen sind und daher die Haftpflichtversicherungen die entstandenen Schäden ausgleichen, würde bei durch autonome Fahrzeuge verursachten Unfällen die Betreiberhaftung des Fahrzeughalters oder die Produkthaftung der Hersteller greifen (s. Kap. 26; vgl. auch [4], [7]).

30.3.2 Risikokonstellation Verkehrssystem

Auf der Systemebene verspricht das autonome Fahren mehr Effizienz, eine Verringerung von Staus und eine (vermutlich jedoch nur geringfügig, vgl. [4], [13]), bessere Umweltbilanz (s. Kap. 16). Im traditionellen Verkehrssystem entstehen systemische Effekte und damit auch mögliche Risiken vor allem durch die verfügbare Verkehrsinfrastruktur und ihre Engpässe in Verbindung mit dem individuellen Fahrverhalten sowie dem Verkehrsaufkommen. Einzelne Situationen wie schwere Unfälle oder Baustellen können zu systemischen Effekten wie Staus führen. Das autonome Fahren fügt den möglichen Ursachen für systemische Effekte eine weitere hinzu: die zugrunde liegende Technologie. Im Folgenden wird nur der Fall betrachtet, dass die autonomen Fahrzeuge nicht bordautonom, sondern auf eine Internetverbindung angewiesen sind.

Durch die Steuerungssoftware und die Angewiesenheit auf das Internet (z. B. im Rahmen eines „Internet der Dinge“) könnten neue Effekte hervorgerufen werden (s. Kap. 24). Während in der bisherigen Autowelt die Fahrzeuge mehr oder weniger unabhängig voneinander bedient werden und sich Massenphänomene nur emergent durch das ungeplante Zusammenwirken der vielen individuell geführten Fahrzeuge ergeben, wird der autonom geführte Verkehr zu einem gewissen Anteil durch Leitzentralen und Vernetzung verbunden sein, z. B. um den Verkehr optimal durch miteinander verbundene Autobahnpiлотen (s. Kap. 2) zu lenken. Die Steuerung einer großen Zahl von Fahrzeugen wird voraussichtlich durch eine der Grundstruktur nach identische Software erfolgen, weil Komplexität und Firmenkonzentration vermutlich die Zahl von Zulieferern stark begrenzen werden. Jedenfalls theoretisch könnte es dadurch zu simultanem Ausfall oder zu simultanem Fehlverhalten einer großen Zahl von Fahrzeugen kommen, basierend auf dem gleichen Softwareproblem. Diese Probleme wären dann nicht mehr, wie bei den o. g. Unfällen, räumlich, zeitlich und in der Schadensgröße überschaubar, sondern könnten volkswirtschaftlich relevante Dimensionen annehmen.

Insofern autonome Fahrzeuge über das Internet oder andere Technologien miteinander vernetzt sind, kann das System autonomen Fahrens als ein koordiniertes Megasystem angesehen werden. Dessen Komplexität wäre extrem hoch, vor allem auch weil es menschlich bedienten Verkehr integrieren müsste – die Musterkonstellation für schlecht oder möglicherweise gar nicht antizipierbare systemische Risiken, in denen sich Risiken komplexer

³ Übrigens wäre davon auch ein wesentliches Geschäft der Versicherungsbranche betroffen, die Pkw-Haftpflicht.

Technik und Software mit unvorhergesehenem menschlichem Handeln zu unerwarteten Systemproblemen aggregieren könnten [15].

Ein ganz anders gelagertes Systemproblem könnte, wiederum nur für den Fall nicht bordautonom, sondern vernetzter Fahrzeuge, ein versteckter Zentralismus und eine damit verbundene Konzentration von Macht sein. Da die Optimierung auf Systemebene nur über überregionale Leitzentralen erfolgen kann (s. Kap. 24), ist – bei aller Dezentralität auf Seiten der Nutzer – eine gewisse Zentralisierung auf der Steuerungs- und Managementebene wohl unverzichtbar. Hier könnte die Sorge erwachsen, dass durch von der Technologie erzeugte Notwendigkeiten möglicherweise problematische gesellschaftliche Folgen eintreten könnten: ein zentral gesteuertes Verkehrssystem als Vorbote einer zentralistischen Gesellschaft, deren Lebensnerv eine „Megainfrastruktur“ wäre, die sich einer demokratischen Kontrolle entzöge. Dies ist jedoch kein absehbares gesellschaftliches Risiko des autonomen Fahrens und schon gar keine notwendig damit verbundene Entwicklung. Vielmehr handelt es sich um eine Befürchtung der Art, dass man auf diese mögliche problematische Entwicklung in der Etablierung des autonomen Fahrens kritisch achten muss, um gegebenenfalls gegensteuern zu können.

In all diesen Feldern bilden die Entscheidenden ein komplexes Geflecht aus Automobilkonzernen, Softwareproduzenten, politischen Regulierern und Behörden mit verteilten Verantwortlichkeiten. Möglicherweise kommen auch neue Akteure hinzu, deren Rollen heute nicht absehbar sind. Entscheidende und Betroffene fallen zu einem großen Teil auseinander. Und da es für Verkehrsteilnehmer und -teilnehmerinnen oder auch andere Bürgerinnen und Bürger praktisch keine Möglichkeit gäbe, solchen Risiken auszuweichen, ist über diese Dinge gesellschaftsweit eine offene Debatte zu führen, um die Entwicklung sorgfältig zu beobachten und zu bewerten sowie gegebenenfalls politische oder regulatorische Maßnahmen einzuleiten.

30.3.3 Risikokonstellation Investitionen

Erforschung und Entwicklung von Technologien des autonomen Fahrens sind extrem aufwendig und damit entsprechend kostenintensiv. Zulieferer und Automobilkonzerne investieren bereits gegenwärtig, und bis zu einer möglichen Einführung des autonomen Fahrens wären weitere erhebliche Investitionen erforderlich. Wie bei anderen Investitionen besteht auch hier das betriebliche Risiko, dass der *Return on Investment* nicht in der erwarteten Größenordnung oder nicht im erwarteten Zeitraum kommt, weil autonomes Fahren sich nicht in größerem Umfang durchsetzt, aus welchen Gründen auch immer. Auf der anderen Seite besteht bei einem Verzicht auf diese Investitionen das Risiko, dass Konkurrenten auf autonomes Fahren setzen und im Erfolgsfall erhebliche Steigerungen ihres Marktanteils verzeichnen. Hier müssen also strategische Unternehmensentscheidungen unter Abwägung der unterschiedlichen Risiken getroffen werden.

Dies ist zunächst ein Standardfall der Unternehmensführung und eine klassische Aufgabe des Managements. Aufgrund der Größenordnung der zu tätigenen Investitionen und des

für das autonome Fahren benötigten langen Atem haben diesbezügliche Entscheidungen weit in die Zukunft reichende Folgen. Betroffen im Falle von Fehlentscheidungen wären zunächst die Aktionäre und die Belegschaft der jeweiligen Unternehmen, im Falle dadurch ausgelöster größerer Krisen auch die Volkswirtschaft, z. B. in Deutschland mit seiner starken Abhängigkeit von der Automobilindustrie. Die Größe der ökonomischen Herausforderung kann es geraten erscheinen lassen, auch in einer prinzipiellen Wettbewerbssituation strategische Koalitionen für eine gemeinsame Basistechnologieentwicklung einzugehen.

Auch nach erfolgreicher Markteinführung kann es zu Pannen oder auch durch die Technologie verursachten Systemeffekten (s. Abschn. 30.3.2) kommen, welche sich zu einem erheblichen Risiko für die davon betroffenen Marken auswachsen können (s. Kap. 21 und Kap. 28). Ein in diesem Zusammenhang eigens zu erwähnender Risikofaktor ist die Komplexität der für autonomes Fahren erforderlichen Software. Komplexe Software lässt sich bekanntlich nicht vollständig testen, sodass in der Nutzungspraxis unerwartete Probleme auftreten können (zur Testbarkeit und Absicherung des Systems s. Kap. 21). Die Nutzung ist in diesem Sinne auch nur eine weitere Testphase, die Nutzenden sind auch Testende. Dies ist bereits heute auch in der Autowelt ein Stück weit der Fall, sind doch Softwareprobleme ein relativ häufiger Grund für Pannen. Ob die Autofahrerinnen und Autofahrer sich in einem noch stärkeren Sinne als „Testpersonen“ einsetzen lassen, ist eine offene Frage. Diese Bereitschaft dürfte in sicherheitsrelevanten Fragen kaum vorhanden sein. Wenn ein Computer wegen eines Softwarefehlers abstürzt, ist das ärgerlich. Wenn ein autonomes Fahrzeug wegen eines Softwarefehlers einen Unfall verursacht, ist das nicht akzeptabel. In einem solchen Fall ist – anders als bei „normalen“ Unfällen – eine erhebliche massenmediale Aufmerksamkeit zu erwarten.

Insbesondere durch die Macht der Bilder und deren massenmediale Verbreitung können derartige Vorfälle eine erhebliche Wirkung sogar dann haben, wenn es sich um leicht korrigierbare Phänomene handelt und die Folgen nicht dramatisch waren. Auf diese Weise ist beispielsweise das Wort „Elchtest“ durch die Publikation eines Vorfalles auf einer Teststrecke bis heute sprichwörtlich geworden. Ein anderes Beispiel ist die Geschichte des längerfristigen Reputationsverlustes von Audi auf dem amerikanischen Markt aufgrund eines Berichts in den US-Medien 1986 (s. Kap. 28). Unabhängig von der Schwere der Panne drohen auf diesem Wege Reputationsverlust und damit ökonomische Risiken. Diese drohen auch durch mögliche Massen-Rückrufaktionen, die schon für sich eine ökonomische Belastung darstellen, die aber vermutlich durch den Reputationsverlust noch überwogen wird. Die Wahrscheinlichkeit derartiger Entwicklungen steigt mit der Komplexität der benötigten Software, die sich auf diese Weise als zentraler Aspekt der Risiken des autonomen Fahrens herausstellt.

30.3.4 Risikokonstellation Arbeitsmarkt

Technische und sozio-technische Umbrüche haben üblicherweise Folgen für den Arbeitsmarkt. Insbesondere mit der Automatisierung waren und sind Befürchtungen der Vernichtung von Arbeitsplätzen verbunden. Der Automatisierung in Produktion und Fertigung

in den 1980er-Jahren sind allein in Deutschland Millionen von Arbeitsplätzen zum Opfer gefallen, vorwiegend im Bereich einfacher mechanischer Tätigkeiten. Es war eine erhebliche gesellschaftliche Anstrengung erforderlich, um durch Qualifizierung und Umschulung wenigstens einem Teil der Betroffenen andere Tätigkeitsfelder zu ermöglichen. Gegenwärtig gibt es Befürchtungen, dass die nächste Welle der Automatisierung auch anspruchsvollere Tätigkeiten überflüssig machen könnte. Auf der positiven Seite stehen bei Automatisierungsschritten die Entstehung neuer Tätigkeitsfelder und Arbeitsmöglichkeiten, sodass die Gesamtbilanz nicht unbedingt negativ sein muss. Jedoch sind diese neuen Tätigkeitsfelder in der Regel nur für höher qualifizierte Mitarbeiter zugänglich.

Eine umfassende Realisierung des autonomen Fahrens hätte zweifellos Auswirkungen auf den Arbeitsmarkt. Betroffen wären primär Fahrerinnen und Fahrer von Fahrzeugen, die bisher manuell bedient werden: Lastwagenfahrer, Taxifahrer, Mitarbeiter von Logistik- und Zustellunternehmen, insbesondere im Use-Case des „Vehicle on Demand“ (s. Kap. 2). Eine gar vollständig auf autonomes Fahren umgestellte Mobilitätswelt würde weitgehend ohne diese Berufe auskommen. Auf der anderen Seite könnten neue Berufsfelder in der Steuerung und Überwachung des autonomen Verkehrs entstehen, würden in Entwicklung, Test und Herstellung der entsprechenden Systeme hoch qualifizierte Mitarbeiter benötigt, vor allem in der Zulieferindustrie.

Damit ergibt sich hier ein ähnliches Spannungsfeld wie oben für die bisherigen Wellen der Automatisierung geschildert: Wegfall eher einfacher Arbeitsplätze und das Entstehen neuer, höher qualifizierter Positionen. Über das quantitative Verhältnis lässt sich aus heutiger Sicht wohl nichts aussagen. Klar ist jedoch aufgrund der hohen Zahl der möglicherweise Betroffenen, dass frühzeitig über pro-aktive Maßnahmen zum Umgang mit dieser Entwicklung nachgedacht werden muss, z. B. durch Entwicklung und Angebot von Qualifizierungsmaßnahmen. Da davon auszugehen ist, dass die Integration des autonomen Fahrens in das gegenwärtige Verkehrssystem allmählich erfolgt und weil Erfahrungen aus anderen Automatisierungsvorgängen vorliegen, dürften die Voraussetzungen hier recht gut sein. Um eventuell für den Arbeitsmarkt problematische Entwicklungen frühzeitig zu erkennen, ist entsprechende Forschung und die Kooperation von Gewerkschaften, Arbeitgeber und Arbeitsagentur zur Beobachtung aktueller Entwicklungen erforderlich.

30.3.5 Risikokonstellation Zugangsgerechtigkeit

Das autonome Fahren verspricht mehr Zugangschancen für mobilitätseingeschränkte Personen, z. B. ältere Menschen. Während dies offensichtlich auf der ethischen Habenseite steht, könnte es auch zu Gerechtigkeitseinbußen kommen, die als „mögliche Schäden“ eben auch als Risiken zu bezeichnen wären. Hierzu gehören vor allem gelegentlich geäußerte Sorgen um eine Kostensteigerung individueller Mobilität durch die Kosten des autonomen Fahrens. In einem Mischsystem könnte man diesen Sorgen entgegenhalten, dass ja die Alternative des traditionellen Selbstfahrens weiter besteht und es also keine Verschlechterung geben würde.

In diesem Szenario würde sich allerdings die Frage stellen, wer von den Vorzügen des autonomen Fahrens, also vor allem Sicherheit und Komfort, überhaupt profitieren würde. Wenn das autonome Fahren nur dazu führen würde, dass alle, die sich heute chauffieren lassen können, dann auf ihre Chauffeure verzichten und dadurch auch noch trotz erhöhter Anschaffungs- und Betriebskosten autonomer Fahrzeuge in der Gesamtbilanz Kosten einsparen würden, käme dies sicher nicht einer größeren Zugangsgerechtigkeit zur Mobilität zugute. Das wäre vor allem dann nicht der Fall, wenn ein Großteil derjenigen, die heute selbst fahren, aufgrund der Kosten keinen Zugang zum autonomen Fahren hätte. Derartige im Hinblick auf Verteilungsgerechtigkeit problematische Entwicklungen wären freilich erstens nicht sehr spezifisch für das autonome Fahren, denn die gerechte Verteilung der Vorteile neuer Technologien ist eine Grundsatzfrage im technischen Fortschritt. Zweitens bliebe diese Sorge spekulativ, da zu den Kosten keine belastbaren Aussagen vorliegen.

Gerechtigkeitsprobleme könnten sich in Bezug auf die Kosten einer möglicherweise zu etablierenden neuen Infrastruktur für autonomes Fahren stellen [13], [4]. Wenn dies z. B. als öffentliche Aufgabe gesehen und über Steuergelder finanziert würde, würden auch Nichtnutzer das autonome Fahren mitfinanzieren. Wenn die Kosten auf alle Autofahrerinnen und -fahrer umgelegt würden, würden sich ebenfalls die Nichtnutzer als Subventionierende des autonomen Fahrens sehen. Je nachdem wie hoch die Infrastrukturkosten und damit die Belastungen wären, könnte dies zu Gerechtigkeitsdebatten über die Verteilung der Kosten Anlass geben.

30.3.6 Risikokonstellation Privatheit

Bereits heute liefern moderne Automobile eine Fülle von Daten und hinterlassen elektronische Spuren, z. B. durch Verwenden einer Navigationshilfe oder durch an die Hersteller übermittelte Daten. Falls autonome Fahrzeuge nicht bordautonom wären, sondern ständig vernetzt sein müssten, würden die elektronischen Spuren ein vollständiges Bewegungsprofil ergeben [13]. Nun müssen Bewegungsprofile von Fahrzeugen nicht identisch sein mit Bewegungsprofilen von Nutzerinnen und Nutzern. Bei Vehicles-on-Demand (s. Kap. 2) ist es natürlich vorstellbar, dass diese anonym genutzt werden könnten, wenn Bestellung und Bezahlung anonym erfolgen – was jedoch angesichts der gegenwärtigen Entwicklung hin zu elektronischen Systemen eher inkonsequent erscheint.

Bewegungsprofile sind eine wertvolle Information für Geheimdienste, die etwa die räumliche Bewegung von Regimegegner verfolgen könnten, aber auch für Unternehmen, die z. B. daraus Profile für zielgenaue Werbung ableiten könnten. Angesichts der zunehmenden Digitalisierung und Vernetzung von immer mehr Bereichen des gesellschaftlichen und individuellen Lebens stellt die spezifisch zusätzliche Digitalisierung im autonomen Fahren vermutlich nur ein Element neben vielen anderen dar. Das Problem – bereits heute wird immer wieder von einem Ende der Privatheit gesprochen – ist um ein Vielfaches größer, wie dies die aktuellen Debatten um NSA, Industrie 4.0 und Big Data zeigen. Das Entstehen einer konvergierenden Megainfrastruktur aus Verkehrssystem, Informations-

versorgung, Kommunikationssystemen, Energiesystemen und möglicherweise weiteren, bisher getrennt funktionierenden Infrastrukturen stellt eine der großen Herausforderungen der nächsten Jahre oder sogar Jahrzehnte dar. Es wird darum gehen, Grenzen zwischen Privatheit und Öffentlichkeit neu zu definieren und die Entscheidungen dann auch umzusetzen. Dies muss auf der politischen Bühne erfolgen und ist von demokratietheoretischer Bedeutung, da die absolute Transparenz nur Kehrseite eines totalitären Systems wäre. Das autonome Fahren ist in dieser Auseinandersetzung vermutlich von nur geringer spezifischer Bedeutung.

30.3.7 Risikokonstellation Abhängigkeit

Moderne Gesellschaften sind zunehmend vom reibungslosen Funktionieren von Technik abhängig. Dies beginnt mit der Abhängigkeit vom individuellen Computer und Auto und reicht bis hin zur vollständigen Abhängigkeit von einer funktionierenden Energieversorgung und dem Funktionieren der weltweiten Datenkommunikationsnetze und Datenverarbeitung als Voraussetzung der globalen Wirtschaft. Komplexer werdende Infrastrukturen wie z. B. die Elektrizitätsversorgung, die durch erneuerbare Energieträger immer stärker mit fluktuierendem Angebot umgehen muss, beinhalten verstärkt „systemische Risiken“ [15], welche aus kleinen Ursachen durch komplexe Verkettungen und positive Rückkopplungen zu Systeminstabilitäten führen können. Diese immer häufiger thematisierte Anfälligkeit gegenüber technischem Versagen und zufälligen Ereignissen, aber auch gegenüber terroristischen Angriffen auf die technischen Lebensnerven der Gesellschaft (z. B. in Form eines Cyber-Terrorismus als Angriff auf das informationstechnische Rückgrat der globalisierten Ökonomie), stellt eine nicht intendierte und unerwünschte, gleichwohl unvermeidliche Folge der beschleunigten Technisierung dar [10]. Hierbei handelt es sich um Risiken, die sich mehr oder weniger schleichend einstellen, die vielfach nicht bewusst unter expliziten Verfahren einer Risiko-Chance-Abwägung in Kauf genommen werden, sondern die möglicherweise erst dann ins öffentliche Bewusstsein treten, wenn die Abhängigkeit fühlbar wird, etwa bei einem längerfristigen Blackout der Stromversorgung, der praktisch alles gesellschaftliche Leben lahm legen würde [12].

Bei einer weitgehenden Umstellung der Mobilität auf autonomes Fahren würde selbstverständlich ein großer Teil der gesellschaftlichen Mobilitätsbedürfnisse vom Funktionieren dieses Systems abhängen. Ein Zusammenbruch wäre dann noch tragbar, wenn es genügend Menschen gibt, die die Fahrzeuge auch manuell bedienen können. In einem System, das etwa beim individuellen Personenverkehr eine Umschaltung von autonom auf manuell erlaubt, wäre dies kein Problem. Falls jedoch beispielsweise weite Teile der Logistik und des Güterverkehrs auf autonome Systeme umgestellt würden, wäre schwer vorstellbar, für den Fall eines länger andauernden Komplettausfalls des Systems ein umfangreiches Fahrpersonal vorzuhalten, zumal die Fahrzeuge dann auch so ausgestattet sein müssten, dass sie manuell betrieben werden können. Auch wenn wesentliche Logistikketten durch einen Systemausfall für längere Zeit unterbrochen würden, könnte es recht

schnell zu Engpässen kommen, sowohl in der Versorgung der Bevölkerung als auch, um die Produktion in der Industrie aufrechtzuerhalten [12]. Dieser Risikotyp ist nichts Neues: Die seit der Energiewende häufiger thematisierte massive Abhängigkeit von einer verlässlich funktionierenden Stromversorgung, aber auch die Abhängigkeit der Weltwirtschaft vom Internet sind strukturell ähnlich.

Eine andere Form der Abhängigkeit durch autonomes Fahren kann auf individueller Ebene durch das Verlernen von Kompetenzen entstehen. Eine starke Nutzung autonomer Fahrzeuge würde den Verlust von Fahrpraxis bedeuten. Werden die Fahrzeuge dann manuell bedient, z. B. am Wochenende oder im Urlaub, kann sich die verminderte Fahrpraxis – sozusagen eine Abhängigkeit von autonom geführten Fahrzeugen – in einer verminderten Kompetenz, z. B. zur Beherrschung von unerwarteten Situationen, niederschlagen. Im Falle eines Totalausfalls des Systems wäre auf den Verkehrswegen auf einmal eine große Zahl von manuell geführten Fahrzeugen unterwegs – möglicherweise wäre dann auch die verringerte Kompetenz der Lenker problematisch. Zusätzlich würde es vermutlich zu erheblichen Engpässen und Staus kommen, wenn die erwarteten Effizienzgewinne auf Systemebene (s. Abschn. 30.3.2) plötzlich verschwinden.

Schließlich wächst mit der weiteren Digitalisierung und der Übergabe von Autonomie an technische Systeme die gesellschaftliche Anfälligkeit gegenüber intendierten Störungen und externen Angriffen. Durch Terroristen, Psychopathen oder auch in militärischen Zusammenhängen (*Cyber War*) wäre dann auch das autonome Fahren betroffen. So könnten die Leitzentralen „gehackt“ werden, es könnte Störsoftware eingebracht oder ein Systemzusammenbruch ausgelöst werden. Abwehrmaßnahmen sind selbstverständlich notwendig und auch technisch möglich; hier kommt es jedoch bekanntermaßen zu dem Hase-Igel-Problem. Aber auch das ist ein Problem, das nicht spezifisch mit dem autonomen Fahren verknüpft, sondern aus der Internetwelt bekannt und z. B. auch bereits in der Energieversorgung angekommen ist.

30.3.8 Zum Verhältnis von Risikokonstellation und Einführungsszenario

Die geschilderten Risikokonstellationen beruhen auf qualitativen und explorativen Gedanken aus der heutigen Mobilitätswelt. Damit haben sie eine gewisse Plausibilität, jedoch ebenfalls spekulative Anteile. Sie dürfen nicht als Prognosen verstanden werden, sondern sind eher Merkposten, die auf dem Weg hin zur Erforschung, Entwicklung und Einführung des autonomen Fahrens berücksichtigt werden sollen. Prognostisch können sie bereits deshalb nicht sein, weil das zukünftige Eintreten bestimmter Risikokonstellationen vom Einführungsszenario des autonomen Fahrens und seiner spezifischen Ausprägung abhängig sein wird – und beide Elemente sind heute nicht bekannt. Ob beispielsweise ein bordautonomes Fahren realisiert werden wird oder ob autonome Fahrzeuge ständig mit dem Internet und Leitzentralen vernetzt sein müssen, wird stark die Ausprägung der Risikokonstellation „Privatheit“ beeinflussen.

Die gesellschaftliche Risikowahrnehmung wird insbesondere stark davon abhängen, wie das autonome Fahren eingeführt wird. Wenn dies auf dem Wege einer allmählichen Automatisierung des Fahrens erfolgt, besteht durch die Möglichkeit eines allmählichen Lernens aus den jeweils bisher gemachten Erfahrungen ein nur geringes Risiko einer „Skandalisierung“ des autonomen Fahrens als Hochrisikotechnologie für Insassen oder externe Betroffene. Schritte auf dem Weg zur weiteren Automatisierung wie Traffic Jam Assist, automatisiertes Valet-Parken oder Automated Highway Cruising (s. Kap. 2), deren Einführung in den nächsten Jahren erwartbar erscheint (s. Kap. 10), würden vermutlich kaum eine erhöhte Risikobeobachtung erzeugen, weil sie auf dem inkrementellen Weg des technischen Fortschritts als quasi natürliche Weiterentwicklungen erscheinen.

Anders z. B. als beim Einschalten eines Kernreaktors verläuft der Prozess der zunehmenden Fahrerassistenz in Richtung auf mehr Automatisierung des Fahrens bislang allmählich. Das Automatikgetriebe ist bereits einige Jahrzehnte alt, mit ASB, ESP und Einparkhilfen sind wir vertraut, und weitere Schritte auf dem Weg zu einem immer stärker assistierten Fahren sind in der Entwicklung. Eine inkrementelle Einführung erlaubt ein Maximalmaß des Lernens und würde auch die allmähliche Adaptation etwa des Arbeitsmarktes oder der Anforderungen an Privatheit (s. Abschn. 30.3.6) erlauben.

In eher revolutionären Einföhrungsszenarien (s. Kap. 10) würden sich andere und wohl auch größere Herausforderungen an die prospektive Analyse und die Wahrnehmung von Risiken stellen. Die öffentliche Wahrnehmung würde dann besonders sensibel auf Unfälle oder kritische Situationen reagieren, die Gefahr einer „Skandalisierung“ wäre größer, und die Risikokonstellation „Investitionen“ (s. Abschn. 30.3.3) könnte sich für einzelne Zulieferer oder Marken zu einem realen Problem entwickeln.

30.4 Einordnung in bisherige Risikodebatten

In Deutschland und anderen industrialisierten Ländern liegen umfangreiche Erfahrungen mit Akzeptanz- und Risikodebatten aus mehreren Jahrzehnten vor. In diesem Abschnitt sollen die Lehren aus diesen vergangenen Risikokommunikationen gezogen und auf das autonome Fahren übertragen werden – insofern das aufgrund der sehr unterschiedlichen Risikokonstellationen möglich ist.

30.4.1 Erfahrungen aus den großen Risikodebatten

Kernenergie

Die Risikokonstellation der Kernenergie bestand vor allem darin, dass auf der einen Seite Entscheidende aus Politik und dann auch der Wirtschaft standen, unterstützt durch Expertinnen und Experten aus den einschlägigen Natur- und Ingenieurwissenschaften. Auf der anderen Seite befanden sich die Betroffenen, vor allem Anwohner an den Standorten für Kernkraftwerke, an der geplanten Wiederaufbereitungsanlage oder am früher geplanten

Endlager Gorleben, darüber hinaus aber auch beträchtliche und wachsende Teile der deutschen Bevölkerung.

Die Kernenergie ist eine typisch lebensweltferne Technologie. Auch wenn von dem erzeugten Strom viele profitieren, ist die Quelle des Stroms nicht sichtbar, wie die Rede-weise zeigt, dass „der Strom aus der Steckdose“ komme. Die Möglichkeit eines GAU mit katastrophalem Schadenspotenzial, wie etwa in Tschernobyl und Fukushima real geschehen, die Tatsache, dass deswegen keine Versicherungsgesellschaft bereit war und ist, die Risiken der Kernkraftwerke zu versichern, die radioaktiven Hinterlassenschaften, die für eine extrem lange Zeit Belastungen erzeugen – all dies zeigt, dass die Risikokonstellation der Kernenergie eine absolut andere als die des autonomen Fahrens ist. Nur in einem Punkt könnte gelernt werden:

Die frühe Kernenergie-Debatte in Deutschland war geprägt von einer Arroganz der Expertinnen und Experten, die damals fast sämtlich Kernenergiebefürworter waren, gegenüber Kritik. Sorgen aus der Bevölkerung wurden nicht ernst genommen, sondern Kritiker wurden als irrational, vorgestrig oder unwissend dargestellt [14]. Auf diese Weise wurde Vertrauen in mehrfacher Hinsicht verspielt: Vertrauen in das Geflecht aus Experten, Wirtschaft und Politik, das hinter der Kernenergie stand, Vertrauen in das Funktionieren demokratischer Prozesse und Vertrauen in das Expertentum in diesem Feld, aber auch darüber hinaus. Man kann aus der Risikodebatte zur Kernenergie lernen, wie wichtig Vertrauen in Institutionen und Personen ist, und wie rasch dieses verspielt werden kann.

Grüne Gentechnik

Die Risikokonstellation in der Debatte zur Grünen Gentechnik ist in anderer Hinsicht interessant. Trotz einer rhetorischen Fokussierung auf Risiken, z. B. durch Freisetzung und unkontrollierte Verbreitung gentechnisch veränderter Organismen, ist das eigentliche Thema weniger die konkrete Größe dieses Risikos, sondern eher die Verteilung von Risiken und Nutzen. Denn der Endverbraucher hätte (anders als bei der Gentechnik für medizinische Zwecke) keinen ersichtlichen Nutzen aus gentechnisch veränderten Nahrungsmitteln. Bestenfalls wären die gentechnisch veränderten Nahrungsmittel nicht schlechter als die traditionell erzeugten. Der Nutzen käme vor allem den Lebensmittelkonzernen zugute. In Bezug auf mögliche gesundheitliche Risiken (z. B. Allergien) sähe es jedoch gerade anders aus: Sie würden die Nutzerinnen und Nutzer betreffen. Das ist natürlich für diese eine schlechte Bilanz: vom Nutzen ausgeschlossen, aber möglichen Risiken ausgesetzt. Diese Sicht dürfte eine plausible Erklärung für mangelnde Akzeptanz sein und die Lehre erlauben, beim autonomen Fahren nicht nur auf abstrakten Nutzen (z. B. für die Volkswirtschaft oder die Umweltbilanz) abzuheben, sondern den Nutzen für die „Endverbraucherinnen und -verbraucher“ in den Mittelpunkt zu stellen.

Ein Zweites kommt hinzu: Der Versuch der Lebensmittelkonzerne, vor allem von Monsanto, die Grüne Gentechnik mit Macht in Europa durchzusetzen, hat gerade das Misstrauen und den Widerstand beflügelt. Druck und massiver Lobbyismus führen in sensiblen Bereichen wie bei Nahrungsmitteln zur Sensibilisierung der Verbraucherinnen und Verbraucher und zu Misstrauen. Ein „Durchdrücken“ von neuen Technologien in lebens-

weltnahen Bereichen, wie es das Autofahren ja auch ist, erscheint vor diesem Hintergrund als eine in sich riskante Strategie.

Mobile Kommunikationstechnologien

Die Mobiltechnologien (Handys, mobile Internetnutzung) sind ein interessanter Fall für Technologieeinführungen, die trotz öffentlicher Risikodiskussion gelungen sind. Obwohl es seit über zehn Jahren eine lebhafte Risikodiskussion zu elektromagnetischer Strahlung (EMF) gibt, hat dies der Akzeptanz auf der individuellen Ebene keinen Abbruch getan. Nur Standorte von Sendemasten sind immer wieder Gegenstand von Protest und Opposition. Gegen die Technologie als solche gibt es jedoch praktisch keine Opposition. Die naheliegende Erklärung ist, dass der Nutzen, und zwar nicht der volkswirtschaftliche, sondern der für jeden Einzelnen erfahrbare individuelle Nutzen, einfach zu überwältigend ist.

Auch die schweren und öffentlich diskutierten Risiken für Privatheit, die in den letzten Jahren anlässlich vieler Ausspähungen durch Unternehmen und Geheimdienste bekannt geworden sind, haben kaum zu einer Zurückhaltung der Verbraucherinnen und Verbraucher geführt. Mobiles Telefonieren, Online-Banking, e-Commerce und das ständige online Sein erlauben die Erstellung von verblüffend zutreffenden Profilen – was aber die Nutzerinnen und Nutzer nicht abhält, weiterhin diese Technologien anzuwenden und dauernd private Daten preiszugeben. Es ist wohl der unmittelbar erfahrbare Nutzen, der uns die Risiken auch dann akzeptieren lässt, wenn wir sie kennen und kritisieren.

Nanotechnologie

Seit dem Aufkommen einer Risikodebatte zur Nanotechnologie vor fast fünfzehn Jahren ist diese Technologie von Befürchtungen begleitet, ihr könne ein ähnliches Desaster in Bezug auf die öffentliche Wahrnehmung drohen wie der Kernenergie oder der Grünen Gentechnik. Frühe und extrem weitreichende, jedoch rein spekulative Befürchtungen in Form von Horrorszenarien wie ein Kontrollverlust des Menschen über die Technik sind jedoch aus der Debatte wieder verschwunden, ohne dass es zu diesen Effekten gekommen ist. Die Nanotechnologie wurde im Rahmen einer offenen Diskussion von den spekulativen Höhen zwischen Paradieserwartungen und apokalyptischen Befürchtungen zu einer „normalen“ Technologie, deren konkrete Vorteile sich vor allem in neuen Materialeigenschaften durch Beschichtungen oder Beimischungen von Nanopartikeln zeigen.

Aber auch hier gab es Befürchtungen einer massiven Ablehnung. Forderungen von Organisationen wie der ETC-Group oder dem BUND nach einer strengen Auslegung des Vorsorgeprinzips, etwa in Form eines Moratoriums der Verwendung von Nanopartikeln in marktgängigen Produkten wie Kosmetika oder Lebensmitteln, gelten hierbei als Indizien. Eine fundamentalistische Verhärtung der Fronten ist jedoch trotz entsprechender Szenarien nicht eingetreten. Ein Grund dürfte sein, dass die Risikokommunikation in diesem Fall ganz anders gelaufen ist als bei Atom- und Gentechnik. Während dort früher die Expertinnen und Experten häufig Sorgen und Bedenken nicht ernst genommen, sondern als irrational abqualifiziert und eine Botschaft des „Wir haben alles unter Kontrolle“ vertreten haben, war und ist die Risikodiskussion zur Nanotechnologie von Offenheit gekennzeichnet.

Wissenschaftler und Wirtschaftsvertreter haben nicht bestritten, dass es Wissensdefizite über mögliche Risiken gibt und dass Risiken so lange nicht ausgeschlossen werden können, bis die Toxikologie weiter vorangeschritten ist. Auf diese Weise wurde Vertrauen geschaffen. Man könnte es paradox formulieren: Weil auf allen Seiten offen über Nichtwissen und mögliche Risiken diskutiert wurde und wird, blieb die Debatte konstruktiv. Das weitgehende Nichtwissen über mögliche Risiken wurde als Forschungsaufgabe akzeptiert, statt zu fordern, Produkte mit Nanomaterialien nicht in den Markt zu bringen. Statt sich auf die absolute Vermeidung von Risiken zu kaprizieren (Nullrisiko), wurde Vertrauen für einen verantwortlichen Umgang mit möglichen Risiken geschaffen.

30.4.2 Schlussfolgerungen für das autonome Fahren

Das autonome Fahren wird eine lebensweltnahe Technologie sein, die mit dem Leben von Menschen so eng verbunden ist wie das heutige Autofahren. Das rückt es weit weg von der Kernenergie, während es die Lebensweltnähe gemeinsam mit der Grünen Gentechnik (über deren Einsatz in der Lebensmittelerzeugung) und dem Mobilfunk hat. Aus beiden Risikodebatten kann entnommen werden, wie zentral die Dimension des individuellen Nutzens ist. Während ein solcher vom Verzehr gentechnisch veränderter Nahrungsmittel sogar von den Befürworter kaum erwartet wurde, ist der individuelle Vorteil des mobilen Telefonierens und des mobilen Internetzugangs evident. Und sobald dieser Nutzen erkennbar groß ist, sind Menschen auch bereit, mögliche Risiken einzugehen. Das ist handlungstheoretisch absolut rational. Irrational ist es dagegen, Risiken auf sich zu nehmen, wenn der Nutzen nicht erkennbar ist oder nur anderen Akteuren (Beispiel Monsanto für die Grüne Gentechnik) zukommen würde. Dann kann eine Risikodebatte dramatische Folgen haben und beispielsweise zum K.o. für die Akzeptanz führen.

Eine andere Möglichkeit für eine solche K.o.-Situation kann die Möglichkeit eines GAU darstellen, wie er als sogenanntes „Restrisiko“ charakteristisch für die Kernenergie ist. Dieses wurde durch politische Entscheidungen verordnet, wobei kaum Mitwirkungsmöglichkeiten bestanden. Hier lag also eine weitgehend als passiv empfundene Risikosituation des Ausgeliefertseins an Entscheidungen anderer vor. Aus dieser Konstellation ist nichts direkt für das autonome Fahren zu lernen, da dieses voraussichtlich marktnah in einem vertrauten Kontext des üblichen Verkehrs eingeführt und damit von der faktischen Akzeptanz der Nutzerinnen und Nutzer abhängen würde. Zwar sind auch andere Einföhrungsszenarien denkbar (s. Kap. 10), jedoch ist eine politische Verordnung des autonomen Fahrens kaum vorstellbar. Indirekt kann aus der Geschichte der Kernenergie nur gelernt werden, dass expertokratische Arroganz Misstrauen erzeugt. Eine offene Diskussion „auf Augenhöhe“ – das ist auch eine Lehre aus der Debatte zur Nanotechnologie – ist in einer offenen Gesellschaft eine zentrale Voraussetzung für einen konstruktiven Verlauf von Technikdebatten.

Insgesamt zeigen die Beispiele auch, dass der Vorwurf der Technikfeindlichkeit der Deutschen eine Legende ist, die sich nur an den Erfahrungen mit Kernenergie und Gentechnik festmacht. Alle empirischen Untersuchungen zeigen, dass ansonsten in einem

großen Spektrum der Technik (digitale Techniken, Unterhaltungselektronik, neue Technologien im Automobilbereich, neue Materialien etc.) die Akzeptanz sehr groß ist [1]. Dies gilt auch für einige Technologien, zu denen es durchaus intensive Risikodebatten gab oder gibt, wie z. B. Mobilfunk. Dass bei neuen Technologien heutzutage sofort Fragen nach Risiken gestellt werden, ist noch lange keine Technikfeindlichkeit, sondern Ausdruck der Erfahrung mit der Ambivalenz von Technik und des Wunsches nach möglichst umfassender Information. Vieles, was üblicherweise als Indiz für Technikfeindlichkeit genommen wird, hat mit der Technik wenig zu tun. Bei Stuttgart21 handelt es sich nicht um eine Ablehnung der Eisenbahntechnik, bei Protesten gegen neue Start- und Landebahnen an Großflughäfen nicht um eine Ablehnung der Technologie des Fliegens oder beim Protest gegen Autobahnen und Umgehungsstraßen nicht um eine Ablehnung der Technologie des Autofahrens. Sogar bei Gentechnik und Kernenergie hat die Ablehnung auch stark mit nicht-technischen Faktoren zu tun: Misstrauen in internationale Großkonzerne wie Monsanto oder in eine funktionierende Kontrolle und Überwachung (Beispiel Tebco in Japan).

30.5 Fazit

Risikomanagement muss an die jeweiligen Risikokonstellationen angepasst werden und auf den passenden Ebenen (öffentliche Debatte, rechtliche Bestimmungen, politisch legitimierte Regulierung, betriebliche Entscheidungen etc.) erfolgen. Es basiert auf der Beschreibung der Risikokonstellationen, vertiefter Risikoanalysen in den jeweiligen Feldern und einer gesellschaftlichen Risikobewertung.

30.5.1 Risikobewertung

Die gesellschaftliche Risikobewertung ist ein komplexer Prozess unter Beteiligung vieler Akteure, der teils eigendynamischen und schlecht absehbaren Entwicklungen folgt [15]. Ausgehend von Stellungnahmen besonders sichtbarer Akteure (im Fall von neuen Technologien häufig auf der einen Seite aus Wissenschaft und Wirtschaft, auf der anderen Seite aus Bürgerinitiativen und Umweltverbänden) kommt es zur allmählichen Verdichtung von Positionen und Gegenüberstellungen in den Massenmedien und der dadurch repräsentierten Öffentlichkeit. Einzelereignisse können Stimmungen kippen oder dramatisch beschleunigen wie z. B. die Reaktorkatastrophen von Tschernobyl und Fukushima in Bezug auf die Kernenergie. Das macht Prognosen extrem schwierig. Im Folgenden wird eine tentative Aussage zum autonomen Fahren unter Aspekten der Plausibilität und der aus vergangenen Debatten gezogenen Lehren versucht.

Zunächst ist zu beachten, dass für Risikobewertungen Vergleiche ganz wichtig sind [8], [13], [15]. Wir beurteilen neue Risikoformen dadurch, dass wir sie in Beziehung zu bekannten Risikoformen setzen. Hierzu liegt beim autonomen Fahren mit dem traditionellen Autofahren eine bekannte Risikokonstellation vor, die als zentraler Vergleichsmaßstab

herangezogen werden kann und sollte (s. Kap. 28 und auch Abschn. 30.3). Insofern in diesem Vergleich das autonome Fahren deutlich und unzweifelhaft besser abschneiden würde (also mehr Sicherheit, weniger Unfallrisiken), wäre dies ein ganz wichtiger Punkt der gesellschaftlichen Risikobewertung.

Zu bedenken ist auch, dass die Risiken des autonomen Fahrens überschaubar in mehrfacher Hinsicht erscheinen. Technikbedingte Unfälle dürften mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit eintreten, die durch eine intensive Testphase minimiert, aber nicht eliminiert werden kann. Ihre Folgen wären, anders als etwa bei der Kernenergie, sowohl in räumlicher und zeitlicher Hinsicht (vgl. Endlagerproblem hoch radioaktiver Abfälle) als auch in Bezug auf die Zahl der involvierten Menschen und die betroffenen Werte überschaubar. Eine GAU-Problematik liegt nicht vor.

Zu einem guten Teil neu ist die mit der Automatisierung des Fahrens möglicherweise verbundene digitale Vernetzung mit all den Folgen für mögliche systemische Risiken, Verletzlichkeit, Datenschutz und Überwachung. Diese werden sicher wichtige Themen einer gesellschaftlichen Debatte auch zum autonomen Fahren sein. Da jedoch diese Herausforderungen auch in einer Vielzahl anderer Handlungsfelder auftreten (zunehmend auch bereits heute bei nicht-autonomen Fahrzeugen), dürften sich daraus kaum spezifische Risikobefürchtungen zum autonomen Fahren entwickeln.

Ein Sonderfall ist die betriebliche Risikobewertung durch die Hersteller (s. Abschn. 30.3.3), sowohl was den erwarteten *Return on Investment* als auch mögliche Reputationsprobleme durch Unfälle im Betrieb beinhaltet. Die betriebliche Bewertung muss hierbei zwangsläufig mit extrem unsicheren Annahmen arbeiten, etwa über die Skandalisierungsbereitschaft von Massenmedien und über die Auswirkungen von Skandalisierungen. Hier kann es in beiden Richtungen zu Fehlwahrnehmungen kommen: übertriebene Sorge oder naive Zuversicht. Es ist jedenfalls zu erwarten, dass in einer gesellschaftlichen Perspektive mögliche Skandalisierungen nicht der Technologie des autonomen Fahrens abstrakt, sondern der jeweilig betroffenen Marke konkret angelastet würden. Das mag zwar für die betroffene Marke kein Trost sein; es weist jedoch darauf hin, dass – jedenfalls solange die Nutzen des autonomen Fahrens fraglos anerkannt sind – dieser Problemtyp sich nur auf den Wettbewerb der Hersteller untereinander, nicht aber auf das autonome Fahren als Technologie auswirken würde. Und das ist bei anderen Technologien bereits heute der Fall.

In der Gesamteinschätzung stellt sich die gesellschaftliche Risikokonstellation als tendenziell entspannt dar. Sie ist nicht zu vergleichen mit Gentechnik und Kernenergie: Es besteht keine GAU-Problematik, der Nutzen ist klar erkennbar, die Einführung erfolgt über einen Markt und nicht über Verordnung „von oben“. Und sie würde vermutlich nicht durch „Umlegen eines Schalters“ von heute auf morgen, sondern allmählich erfolgen.

30.5.2 Risiko und Akzeptanz

Akzeptanz (s. Kap. 29) kann nicht „hergestellt“ werden, wie das gelegentlich erwartet wird, sondern sie kann sich nur „einstellen“ (oder auch nicht). Dieses „sich Einstellen“ hängt von

vielen Faktoren ab, die teilweise durchaus beeinflussbar sind. Grob gesprochen, hängt die gesellschaftliche wie individuelle Akzeptanz stark von der Wahrnehmung von Nutzen wie von Risiken ab. Dabei ist entscheidend, dass die erwarteten Vorteile nicht nur abstrakte volkswirtschaftliche Daten beinhalten, sondern auch konkrete Vorteile für diejenigen darstellen, die die neuen Technologien nutzen. Hinzu kommt die Möglichkeit der Einflussnahme auf die Exposition gegenüber Risiken [9]. Akzeptanz fällt üblicherweise erheblich leichter, wenn die individuellen Personen selbst die Entscheidungshoheit haben (z. B. Ski zu fahren), als wenn die Personen von externen Instanzen den Risiken ausgesetzt und damit in gewisser Weise „fremdbestimmt“ werden.

Wichtig für die Akzeptanz angesichts von Risikobefürchtungen ist auch, dass Nutzen und Risiken (einigermaßen) gerecht und nachvollziehbar verteilt sind (das war das Hauptproblem in der Gentechnikdebatte, s. Abschn. 30.4.1). Geradezu entscheidend ist, dass die relevanten Institutionen (Produzierende, Betreibende, Regulierende, Überwachungs- und Kontrollinstanzen) Vertrauen genießen und dass nicht der Eindruck eines „Durchdrückens“ zulasten der Betroffenen mit ihren Risikobefürchtungen entsteht. Dazu muss die Kommunikation über mögliche Risiken in einer offenen Atmosphäre verlaufen – nichts ist massenmedial verdächtiger als zu behaupten: Risiken gibt es nicht, und wir haben alles unter Kontrolle. Sorgen und Fragen müssen ernst genommen werden und dürfen nicht a priori als irrational vom Tisch gewischt werden. Für all dies ist frühzeitige und offene Kommunikation mit relevanten gesellschaftlichen Gruppen und in der massenmedialen Öffentlichkeit wichtig und, wo angebracht, auch im Sinne einer „partizipativen Technikgestaltung“.

Manches spricht dafür, dass für die Akzeptanz des autonomen Fahrens eher die Nutzenerwartungen als die Risikobefürchtungen entscheidend sind. Immerhin ist Autofahren eine fast vollständig akzeptierte Technologie, obwohl es in Deutschland jährlich über 3000 Verkehrstote gibt. Im Gegensatz etwa zur Kernenergie erscheinen mögliche Schadensfälle von zeitlich und räumlich begrenzter Reichweite. Andere gesellschaftliche Risiken (z. B. Überwachung, s. Abschn. 30.3.3) sind eher abstrakt, während die erwarteten Vorteile teils sehr konkret sind. Die Gegenüberstellung „abstract social gain – concrete human loss“ (s. Kap. 27) sollte daher gerade umgekehrt vorgenommen werden: abstrakte Risiken wie Abhängigkeit von komplexen Technologien oder Probleme mit dem Datenschutz versus konkrete individuelle Vorteile hinsichtlich Sicherheit und Komfort. Eine Risikofokussierung würde daher vermutlich am Kern der Herausforderung vorbeiführen: Entscheidend scheinen eher die Nutzenerwartungen zu sein.

Dies gilt natürlich nur, weil die Risikobewertung keine dramatischen Befunde ergeben hat. Vielmehr stellt die Risikokonstellation des autonomen Fahrens eher ein *business as usual* im technischen Fortschritt dar – sicher mit seinen Ambivalenzen und gesellschaftlichen Risiken, aber auch mit den Möglichkeiten, damit vernünftig und zivil umzugehen. Insbesondere die voraussichtlich allmähliche Einführung des autonomen Fahrens und die damit verbundenen Chancen des Lernens und Verbesserns in Verbindung mit der Abwesenheit von Risiken des „GAU-Typs“ relativieren die Bedeutung von Risikofragen in der weiteren Debatte zum autonomen Fahren wie z. B. zum Arbeitsmarkt oder zu Gerechtigkeitsfragen. Statt einer Risikofokussierung erscheint es angebracht, Elemente und

Optionen autonomen Fahrens als Teile attraktiver Mobilitätszukünfte mit mehr Sicherheit, mehr Effizienz, mehr Gerechtigkeit und mehr Komfort/Flexibilität anzusehen. Zwar gibt es kein Nullrisiko – das hat man aber beim bisherigen Autofahren auch nicht!

Zwei große Akzeptanzrisiken verbleiben: Das eine ist die Möglichkeit der Skandalisierung von Problemen bei Testfahrten oder von Technikversagen, möglicherweise im Kontext von Unfällen, durch massenmediale Berichterstattung (Stichwort Elchtest). Die Folgen wären schwer absehbar. Aber auch hier gilt, dass ja der Elchtest nicht Anlass gegeben hat, die Technologie des Autofahrens abzulehnen. Das Problem bestünde – vorausgesetzt die obige Einschätzung trifft zu, dass die Nutzenerwartungen für die Akzeptanz wichtiger sind als die Risikobefürchtungen – eher darin, dass der Reputationsverlust einzelne Marken treffen würde, nicht die Technologie des autonomen Fahrens insgesamt.

Die zweite große Unbekannte ist die Psychologie des Menschen. Ob und inwieweit Menschen sich, und d. h. im Ernstfall auch ihr Leben und ihre Gesundheit, autonomen Fahrzeugen anvertrauen werden, ist eine offene Frage. Akzeptanzprobleme anderer autonomer Verkehrssysteme wie von U-Bahnen oder von Shuttle-Diensten sind zwar nicht bekannt. Aber schienengebundene Fahrzeuge werden anders wahrgenommen als Autos, z. B. weil es sich dort grundsätzlich um ein „Gefahrenwerden“ und nicht um ein Selbstfahren handelt, weil die entsprechenden Systeme zentral von Leitsystemen gesteuert werden und weil Komplexität und Möglichkeit unvorhergesehener Ereignisse in vielen Situationen beim Autofahren erheblich größer sein dürften als bei schienengebundenen Fahrzeugen.

Weiterhin ist beim Thema Akzeptanz auch daran zu denken, dass im traditionellen Autoverkehr eine weit entwickelte Kultur der Schadensregulierung besteht, die durch Verkehrsgerichtsbarkeit, Gutachterwesen und Versicherungen ein hohes Maß an Präzision und Verlässlichkeit erreicht hat. Für autonomes Fahren hingegen stellen sich neue Herausforderungen an die Schadensregulierung, weil die Frage „Wer verursachte den Schaden – Mensch oder Maschine?“ nachvollziehbar und juristisch einwandfrei beantwortet werden muss. Ob autonomes Fahren akzeptiert werden wird, wird sicher stark mit davon abhängen, dass auf diese Herausforderungen Antworten entwickelt werden, die der Präzision heutiger Schadensregulierung nicht nachstehen (s. Kap. 4 und Kap. 5).

30.5.3 Elemente des gesellschaftlichen Risikomanagements

Die vorgelegte Diagnose zu der Risikokonstellation zum autonomen Fahren in gesellschaftlicher Perspektive legt folgende Maßnahmen zum Risikomanagement nahe bzw. erfordert sie:

- Zulassungskriterien für autonome Fahrzeuge sind von den zuständigen Behörden zu entwickeln; bei Sicherheitsstandards sind hier auch zugrunde liegende ethische Fragen (wie sicher ist sicher genug?) und politische Aspekte (z. B. Gerechtigkeitsfragen, Datenschutz) zu berücksichtigen und gegebenenfalls in ordnungspolitische Maßnahmen zu überführen.

- Zentral sind rechtliche Regelungen zum Umgang mit den möglichen und vor allem kleinräumigen Unfällen beim autonomen Fahren, vor allem zur Schadensregulierung. Hier ist insbesondere die Produkthaftung gefragt (s. Kap. 25 und Kap. 26).
- In diesem Zusammenhang ist über eine Anpassung oder Erweiterung der Straßenverkehrsordnung nachzudenken.
- Konsequenzen für Fahrschulen entstehen hinsichtlich der erforderlichen Kompetenzen von Nutzerinnen und Nutzern autonomer Fahrzeuge, vor allem für den Wechsel des Modus von „manuell“ zu „autonom“ oder umgekehrt.
- Wichtig für das Risikomanagement sind Sicherheitsvorkehrungen, sowohl damit autonom geführte Fahrzeuge in kritischen Situationen sicher zum Halten kommen, als auch für den passiven Schutz der Insassen, wenn dies nicht gelingt.
- Ein Verzicht auf passive Sicherheitsmaßnahmen wie das Anschnallen oder Airbags wäre in dieser Perspektive erst verantwortbar, sobald genügend positive Erfahrungen mit dem autonomen Fahren vorliegen. Daher sollte diese Perspektive nicht zu früh in Aussicht gestellt werden.
- Die zu erwartende allmähliche Einführung von Technologien des autonomen Fahrens eröffnet vielfältige Möglichkeiten des Monitoring und des „Verbesserns im Betrieb“. Ihre Nutzung durch neue Sensor- und Auswertungstechnologien sollte ein wichtiges Element im gesellschaftlichen Risikomanagement sein (s. Kap. 17, Kap. 21 und Kap. 28).
- Risiken zum Arbeitsmarkt sind sorgfältig zu beobachten; im Falle des absehbaren Rückgangs von bisherigen Arbeitsplätzen sollten frühzeitig Maßnahmen zur Weiterbildung und Umschulung angesetzt werden.
- Erhebliche Probleme mit Datenschutz und Privatheit sind zu erwarten, falls das autonome Fahren in vernetzten Systemen stattfindet (wobei jedoch das autonome Fahren keine spezifischen Probleme aufwirft, verglichen mit anderen Handlungsfeldern). Technische und rechtliche Maßnahmen (s. Kap. 24) sind hier vor dem Hintergrund einer übergreifenden gesellschaftlichen Debatte (Stichworte NSA, Datenkraken) zu treffen.
- In Innovations- und Standortpolitik sind nationale Politiken gefragt, mit den jeweiligen Automobilherstellern über eine adäquate Verteilung derjenigen betrieblichen Risiken zu sprechen, die im Schadensfall erhebliche volkswirtschaftliche Auswirkungen hätten, z. B. durch Reputationsverlust aufgrund einer medienwirksamen Panne oder eines Unfalls.
- Im Risikomanagement sind in Bezug auf öffentliche Kommunikation und die Informationspolitik die oben erwähnten Lehren aus Kernenergie- und Nanotechnologiedebatten einschlägig, die auf die Notwendigkeit der Ressource „Vertrauen“ aufmerksam machen.
- Die Einbeziehung von Stakeholdern ist selbstverständlich wichtig und entscheidend für eine gesellschaftliche Einführung bzw. „Aneignung“ des autonomen Fahrens. Hier sind vor allem die in Deutschland sehr einflussreichen Verbände der Autofahrerinnen und Autofahrer zu nennen. Für die gesamtgesellschaftliche Meinungsbildung sind die Massenmedien entscheidend. Weiterhin ist natürlich an den Verbraucherschutz zu denken.

- Es ist für eine erfolgreiche moderne Technikentwicklung zentral, dass sie nicht in einer mehr oder weniger geschlossenen Welt der Ingenieure, Naturwissenschaftler und Manager erfolgt, welche sich dann quasi hinterher um Akzeptanz für ihre eigenen Entwicklungen sorgen muss. Stattdessen sollte der Entwicklungsprozess (jedenfalls in den Teilen, die keinen direkten Wettbewerbsinteressen der Firmen unterliegen) in einer gewissen Offenheit erfolgen. Besagte Stakeholder sollten nicht erst in der Phase der Markteinführung, sondern bereits in der Entwicklung einbezogen werden. Ethische Fragen im Umgang mit Risiken und rechtliche Fragen der Verteilung von Verantwortung sollten parallel zur technischen Entwicklung erforscht und gesellschaftlich diskutiert werden.

Viele der hier angesprochenen Herausforderungen sind von einem komplexen systemischen Typ. Von daher kommt der Systemforschung auf verschiedenen Ebenen besondere Bedeutung zu. Das autonome Fahren sollte nicht simpel als Ersatz heutiger Fahrzeuge durch autonom fahrende thematisiert werden, sondern als Ausdruck neuer Mobilitätskonzepte in einer veränderten Gesellschaft.

Literatur

1. acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften: Akzeptanz von Technik und Infrastrukturen. acatech Position Nr. 9, Berlin 2011. Abrufbar unter: www.acatech.de/de/publikationen/publikationssuche/detail/artikel/akzeptanz-von-technik-und-infrastrukturen.html (Zugriff 29.7.2014)
2. Bechmann, G.: Die Beschreibung der Zukunft als Chance oder Risiko? Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis 16 (1), 24–31 (2007)
3. Becker, U.: Mobilität und Verkehr. In: A. Grunwald (Hrsg.) Handbuch Technikethik, Metzler, Stuttgart (2013), S. 332–337
4. Beiker, S. (2012): Legal Aspects of Autonomous Driving. In: Chen, L.K.; Quigley, S.K.; Felton, P.L.; Roberts, C.; Laidlaw, P. (Hrsg.): Driving the Future: The Legal Implications of Autonomous Vehicles. Santa Clara Review. Volume 52, Number 4. S. 1145–1156. Online abrufbar unter <http://digitalcommons.law.scu.edu/lawreview/vol52/iss4/>
5. Eugensson, A., Brännström, M., Frasher, D. et al.: Environmental, safety, legal, and societal implications of autonomous driving systems (2013). Abrufbar unter: www-nrd.nhtsa.dot.gov/pdf/esv/esv23/23ESV-000467.PDF (Zugriff 29.7.2014)
6. Fraedrich, E., Lenz, B.: Autonomes Fahren – Mobilität und Auto in der Welt von morgen. Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis 23(1), 46–53 (2014)
7. Gasser, T., Arzt, C., Ayoubi, M. et al.: Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung. In: Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Fahrzeugtechnik F 83, Bremerhaven (2012)
8. Gethmann, C.F., Mittelstraß, J.: Umweltstandards. GAIA 1, 16–25. (1992)
9. Grunwald, A.: Zur Rolle von Akzeptanz und Akzeptabilität von Technik bei der Bewältigung von Technikkonflikten“. Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis 14(3), 54–60 (2005)
10. Grunwald, A.: Technikfolgenabschätzung – eine Einführung. Ed. Sigma, Berlin, 2. Aufl (2010)
11. Nida-Rümelin, J.: Risikoethik. In: Nida-Rümelin, J. (Hrsg.) Angewandte Ethik. Die Bereichsethiken und ihre theoretische Fundierung, S. 863–887 Kröner, Stuttgart (1996)

12. Petermann, T., Bradke, H., Lüllmann, A., Poetzsch, M., Riehm, U.: Was bei einem Blackout geschieht. Folgen eines langandauernden und großflächigen Stromausfalls. Berlin, Edition Sigma, 2011
13. POST – Parliamentary Office of Science & Technology: Autonomous Road Vehicles. POSTNOTE 443, London www.parliament.uk/business/publications/research/briefing-papers/POST-PN-443/autonomous-road-vehicles (2013) Zugegriffen 30.7.2014
14. Radkau, J., Hahn, L.: Aufstieg und Fall der deutschen Atomwirtschaft. oekom Verlag München 2013
15. Renn, O., Schweizer, P.-J., Dreyer, M., Klinke, A.: Risiko. Über den gesellschaftlichen Umgang mit Unsicherheit. oekom verlag, München (2008)

Eva Fraedrich, Barbara Lenz

Inhaltsverzeichnis

31.1 Einleitung	688
31.2 Wir fahren ... und fahren ... und fahren	689
31.2.1 Gründe und Motive der Autonutzung	689
31.2.2 Zusammenfassung	692
31.3 Multimethodischer Untersuchungsansatz zum autonomen Fahren in Zusammenhang mit Autonutzung und -besitz	692
31.3.1 Wahrnehmung und Bewertung des autonomen Fahrzeugs in Abhängigkeit von spezifischen Anwendungsfällen	693
31.3.2 Autonomes Fahren in der Zukunft: „Wollen wir wirklich so leben?“	699
31.3.3 Ergebnisse	701
31.3.4 Zusammenfassung	704
31.4 Fazit	704
Literatur	706

E. Fraedrich (✉)
Humboldt-Universität zu Berlin, Geographisches Institut, Deutschland
eva.fraedrich@geo.hu-berlin.de

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

31.1 Einleitung

Das Automobil prägt seit über einem Jahrhundert unsere physische Mobilität wie kein anderes Verkehrsmittel. Beinahe ebenso lange steht es jedoch auch schon im Zentrum einer Kritik, bei der es um ökologische, soziale und gesundheitliche Folgen geht, die mit Automobilität einhergehen.

Autonomes Fahren könnte einen Umbruch im individuellen und gesellschaftlichen Umgang mit dem Automobil nach sich ziehen und damit auch Einfluss nehmen auf Verkehr, Mobilität oder Raumstrukturen. In jüngster Zeit hat das Thema öffentlich viel Aufmerksamkeit erfahren – in den Massenmedien ist es mittlerweile Teil einer regelmäßigen Berichterstattung und auch auf sozialen Plattformen wird autonomes Fahren als Thema aufgegriffen, diskutiert und geteilt. In der öffentlichen Diskussion wird einerseits auf die derzeitige (wahrgenommene) technische Entwicklung abgehoben, aber auch auf den möglicherweise nachdrücklichen Wandel in der Nutzung des Autos, der einhergeht mit veränderten Einstellungen zum Auto und zum Autofahren. Erwartet werden Veränderungen wie z. B. ein dramatischer Rückgang der aktuellen Autobesitzraten [1], [2], eine Reduzierung des Raumes, der derzeit für Parkplätze zur Verfügung steht [3] oder ein Wandel von Automobilbesitz und -nutzung zugunsten von autonomen Carsharing-Flotten [4].

Die wachsende Präsenz des Themas zeigt: Die Debatte um autonomes Fahren und das autonome Fahrzeug kommt offenbar mehr und mehr in der Gesellschaft an. Beim Übergang in eine möglicherweise neue Ära von Autobesitz und -nutzung ist es wichtig, frühzeitig zu fragen, was Menschen mit dem autonomen Fahren verbinden: Wie nehmen sie die Technologie und die Auseinandersetzung damit wahr? In welchen Rahmen ist eine solche Auseinandersetzung eingebettet? Was sind Hoffnungen, Befürchtungen, Fantasien, wo wird die Technologie skeptisch, zuversichtlich, als machbar oder auch als unmöglich gesehen?

Eine erste systematisch fundierte Strukturierung des Themas aus Sicht von Verkehrsteilnehmern hat den Fokus auf die Fülle an unterschiedlichen Themen, Wahrnehmungen und Bewertungen gerichtet, die derzeit mit autonomem Fahren in Verbindung gebracht werden (für Details zur Erhebung und zu den Ergebnissen dieser Explorationsstudie s. Kap. 29). In diesem Zusammenhang ist auch deutlich geworden, dass autonomes Fahren stark aus einem subjektiven Nutzenkontext heraus bewertet wird und gleichzeitig eng an Motive, Werthaltungen und Praktiken zur eigenen Autonutzung gebunden ist. Die Verkehrsmittelwahl, d. h. die Entscheidung für ein bestimmtes Verkehrsmittel, und dabei insbesondere für das Auto, ist wiederum ein tief verwurzelter Teil unserer Alltagspraxis, der eher allmähliche als sprunghafte Veränderungen erwarten lässt [5], [6]. Derzeit ist noch nicht deutlich absehbar, wie eine Zukunft mit autonomen Fahrzeugen aussehen kann oder wird und welche Bereiche unseres Alltags, unseres Zusammenlebens oder unserer Mobilität dadurch Veränderungen unterworfen sein werden. Über den alltagspraktischen Rahmen, in den Autonutzung und -besitz eingebettet sind, wird der Kontext des autonomen Fahrens zumindest vorstellbarer.

Der Beitrag setzt sich zunächst mit aktuellen Erkenntnissen zum Thema Autonutzung und -besitz auseinander. Ausgewählte Ergebnisse aus eigenen Erhebungen richten anschließend den Fokus auf anwendungsbezogene – d. h. konkret, an den im Projekt entwickelten

Use-Cases (s. Kap. 2) orientierte – Perspektiven zum autonomen Fahren und prüfen, in welchem Zusammenhang das Thema mit Motivationen zu Autonutzung und -besitz steht.

31.2 Wir fahren ... und fahren ... und fahren ...

Die Frage, warum Menschen das Auto nutzen, beschäftigt Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler verschiedener Disziplinen – darunter vor allem Psychologie, Soziologie, Verkehrswissenschaften, Wirtschafts- und Sozialwissenschaften – praktisch schon so lange, wie es das Automobil gibt [7]. Diese Debatte wird immer wieder hoch emotional geführt (vgl. [7], [8]), wohingegen Literatur und Studien, die sich mit dem individuellen und gesellschaftlichen Nutzen der Autonutzung auseinandersetzen, in diesem Zusammenhang deutlich in der Minderheit sind (vgl. [9], [10]). Vor dem Hintergrund der Diskussion um eine nachhaltigere Lebensweise, zu der auch die Reduktion des motorisierten Individualverkehrs maßgeblich beitragen könnte, hat sich in den vergangenen Jahren die Suche nach Gründen der Autonutzung intensiviert, was an der steigenden Zahl von wissenschaftlichen, aber auch populärwissenschaftlichen Arbeiten bzw. Texten zum Thema nachvollzogen werden kann.

Darüber hinaus gilt das Automobil als Teil eines komplexen, nicht-linearen Systems – dem System der Auto-Mobilität – das die Voraussetzungen für seine eigene Expansion immer wieder selbst reproduziert, was sich u. a. in wirkmächtigen komplexen technischen, politischen und sozialen Wechselbeziehungen zwischen Industrie, Zulieferern, Infrastrukturen, Ressourcennutzungen, Stadt- und Regionalplanung etc. zeigt [11]. Dadurch hat eine Pfadabhängigkeit eingesetzt und es ist ein „Lock-in“- Effekt entstanden, der sich kaum wieder rückgängig machen lässt (vgl. [11], [12], [13]). Stotz zeigt in diesem Zusammenhang auf, wie das technische Artefakt Automobil aktiv in soziale bzw. gesellschaftliche (Sozialisations-)Prozesse eingebunden ist und auf diese Weise eher den Status eines Subjekts denn den eines Objekts erhält (vgl. [14]). Auch andere Autorinnen und Autoren haben darauf hingewiesen, dass das Automobil selbst schon lange kein äußerliches Objekt mehr zu sein scheint, sondern vielmehr eine symbiotische Erweiterung des menschlichen Körpers (vgl. [15], [16], [17]). Daneben existiert jedoch auch eine Reihe von Untersuchungen, die die Bedeutung des Autos für physisches und psychisches Wohlbefinden und sogar eine höhere Lebenserwartung hervorheben (vgl. [18], [19], [20]).

Die Motivationen, die empirisch aufgedeckt wurden, ein Auto zu nutzen oder es zu besitzen, sind vielfältig. Im Folgenden sollen die dominantesten und aktuellsten Erklärungsversuche kurz vorgestellt werden.

31.2.1 Gründe und Motive der Autonutzung

Instrumentelle Motive

Lange Zeit wurden Motive für Autonutzung und -besitz durch Verhaltensmodelle erklärt, die sich vornehmlich auf instrumentelle bzw. utilitaristische Aspekte stützten (vgl. [21]).

Um ihre alltäglichen Mobilitätsanforderungen zu erfüllen – also verschiedene Aktivitäten an unterschiedlichen Orten auszuführen – greifen Menschen auf unterschiedliche Mittel der Fortbewegung zurück (Auto, Rad, Bahn etc.). Die Gründe dafür sind, so die Annahme, an einem spezifischen Nutzen orientiert: z. B. Verfügbarkeit, Geschwindigkeit, Kosten, Flexibilität, Sicherheit, Komfort etc. Wer daher das Auto als Mittel der Fortbewegung wählt, schätzt es als vorteilhaft gegenüber anderen Verkehrsmitteln ein, wenn es beispielsweise darum geht, schneller von A nach B zu kommen, möglichst günstig und komfortabel in den Urlaub zu fahren oder Zugang zu einem vom Wohnort entfernten Arbeitsplatz zu haben. Ob dieser Nutzen objektiv messbar ist, spielt dabei nur eine untergeordnete Rolle; vielmehr geht es um einen subjektiv wahrgenommenen Nutzen, der nicht unbedingt mit einem tatsächlichen Nutzen zusammenhängen muss (vgl. [22]).

Stadtentwicklungskonzepte wie der „New Urbanism“ oder „Smart Growth“ beziehen sich vornehmlich auf die Annahme, dass instrumentelle Aspekte ausschlaggebend für die Verkehrsmittelwahl seien, und richten infrastrukturelle, verkehrsplanerische und politische Aktivitäten danach aus – Gebiete mit hoher Siedlungsdichte und Mischnutzung (Wohnen, Arbeiten, Einkaufen, Freizeit) sollen Wegelängen und Wegezeiten verkürzen und eine Reduzierung des motorisierten Individualverkehrs ermöglichen (vgl. [23], [24], [25], [26]).

Affektive Motive

Instrumentelle Gründe allein sind jedoch noch nicht ausschlaggebend, um Verkehrsmittelwahlentscheidungen erschöpfend zu erklären [27], [28] – und darüber hinaus können sie auch nicht immer klar von anderen Motiven getrennt werden. Unabhängigkeit und Freiheit, dominante Gründe der Autonutzung, können sowohl als instrumentelle als auch als affektive Aspekte gedeutet werden: Die Freiheit, jederzeit – unabhängig z. B. von Fahrplänen – losfahren zu können, kann ein rationaler Grund für das Auto sein; gleichzeitig kann diese Freiheit auch ein *Gefühl* von Autonomie und Unabhängigkeit vermitteln – ein emotional konnotierter Grund für das Auto (vgl. [6], [29]).

Sowohl bei alltäglichen Fahrten als auch bei Wegen in der Freizeit spielen affektive bzw. emotionale Faktoren eine bedeutende Rolle. Verkehrsmittel wie das Auto sind eng an Emotionen und Empfindungen gekoppelt, die wiederum einen entscheidenden Einfluss auf deren Wahl (oder Nicht-Wahl) ausüben, wenngleich Autonutzerinnen und Autonutzer in direkten Befragungen häufig dazu neigen, ihre Motive und Motivationen zu rationalisieren und emotionale Aspekte „unter den Tisch fallen zu lassen“ [28]. So kann die Autonutzung beispielsweise mit Gefühlen von Entspannung und Vergnügen, Erregung und Begeisterung, der Freude am Fahren oder an der Geschwindigkeit, aber auch von Stress und Anspannung einhergehen; in der Regel wird das Autofahren mit positiven Gefühlen assoziiert [30], [31], [32].

Das Auto als Statussymbol: symbolische Motive und kulturelle Symbolbedeutung

Neben instrumentellen und affektiven Motiven beeinflussen auch symbolische Motive die Wahl des Autos (bzw. des Verkehrsmittels allgemein). Dabei erfüllen sie zwei Funktionen: Einerseits können durch das Nutzen und/oder Besitzen eines spezifischen Fahrzeugs per-

sönliche Wertvorstellungen und Identität ausgedrückt werden. Andererseits unterstreicht dies auch die soziale Einordnung in eine gesellschaftliche Position – ein Auto kann z. B. Status und Prestige vermitteln oder auch Ausdruck einer bestimmten Lebenseinstellung sein [28], [29], [30], [33], [34].

Darüber hinaus fungiert das Automobil selbst als kulturelles Symbol, es repräsentiert Fortschritt, Freiheit, Individualität und Kultiviertheit; es stimuliert Musik, Kunst, Literatur, Film und Werbung; es beeinflusst Familienleben, soziale Interaktion und kulturelle Rituale und ist integraler Bestandteil von Initiationsriten der modernen Gesellschaft (vgl. [11], [35], [36], [37]).

Weitere Ansätze

Neben der nicht immer trennscharfen Unterscheidung (vgl. dazu auch [6], [38]) von instrumentellen, affektiven und symbolischen Motiven existiert mittlerweile eine Reihe von Untersuchungen und Auseinandersetzungen, die das Automobil sowie Gründe für seine Nutzung stärker in den Kontext eines sozio-technischen Systems stellen und beleuchten, auf welche Weise das Auto spezifische soziale Funktionen erfüllt, wie es z. B. räumliche Ungleichheiten und Trennungen aufrechterhält, geschlechtliche Konstruktionen mitprägt oder nationale und kulturelle Identitäten festigen kann (vgl. z.B. [14], [39], [40], [41], [42], [43]).

Ein weiteres, im Kontext von Arbeiten zum Zusammenhang zwischen Autobesitz und autonomem Fahren wichtiges Thema ist das Auto als „privater Raum“ (vgl. [44], [45]). Der „Kokon“ Auto, ein „bewohnter“ Raum, kann als Rückzugsort aus dem als stressig, schnell, laut und überfüllt empfundenen modernen Leben fungieren, und er entfaltet darüber hinaus auch eine besondere Bedeutung hinsichtlich sozialer Interaktion. Laurier und Dant [46] haben auf die Bedeutung dieses „bewohnten“ Raumes auch im Hinblick auf das Aufkommen zunehmender Automatisierung von Fahrzeugen hingewiesen: Die Befreiung von der Fahraufgabe fügt sich ein in eine evolutionäre Entwicklung, bei der es im Zusammenhang mit dem Automobil im Laufe der letzten Jahrzehnte zunehmend weniger um das Ausdrücken von Identität geht (dies zeige sich auch im Bedeutungsverlust von Sportfahrzeugen und der Zunahme von geschlossenen Fahrzeugen mit großem Innenraum) als vielmehr um das temporäre „Bewohnen“ eines Raumes, der auch dazu dient, soziale Interaktionen zu vollziehen. Solche Studien betonen immer wieder, dass weniger individuelle als vielmehr soziale Faktoren eine maßgebliche Rolle bei der Favorisierung des Autos gegenüber anderen Verkehrsmitteln spielen können: Im Raum des Automobils werden spezifische soziale Rollen eingenommen, die Menschen üblicherweise im sozialen Miteinander ausüben (Eltern-Sein, Freund-Sein, Arbeiterin-Sein etc.) [42], [47].

In diesen Kontext könnten auch neuere Arbeiten zur Bewertung der Reisezeit bei der Nutzung unterschiedlicher Verkehrsmittel gesetzt werden (vgl. [27], [48]). Lange Zeit wurde das Fahren im Auto als unproduktive, verschwendete Zeit gesehen – der häufig monotone, immer gleiche Weg zur Arbeit war ein typisches Beispiel dieser Last [49]. Dass im Auto verbrachte Zeit subjektiv aber durchaus als wertvoll, ja sogar als „Geschenk“ wahrgenommen und bewertet werden kann, haben in jüngerer Vergangenheit vor allem Jain

und Lyons [48] mit ihrer Studie über Pendler gezeigt: Reisezeit wurde als Entspannungszeit von der Hektik des Alltags gesehen, als Übergangszeit zwischen Arbeit und Zuhause. Diese Ergebnisse schließen an eine frühere Studie zu Pendlern an, in der Mokhtarian et al. bereits zeigen konnten, dass im Auto verbrachte Zeit durchaus nicht unbedingt als verschwendet angesehen wird [27].

31.2.2 Zusammenfassung

Aktuell gehen Autonutzung und -besitz in den Industrieländern auf eine Situation der Sättigung zu, ohne dass das Automobil deswegen seinen dominanten Stellenwert so schnell verlieren wird [50]. Vielmehr behält es für die große Mehrheit der Autonutzerinnen und -nutzer seine Bedeutung zur Erfüllung ihrer lebensweltlichen Bedürfnisse ([51], S. 114). Wichtig in der Debatte um die künftige Nutzung von autonomen Automobilen (und auch deren Akzeptanz) ist vor allem die Berücksichtigung der Verflechtung von instrumentellen, affektiven und symbolischen Aspekten: Wahrgenommene funktionale Eigenschaften der Technologie stellen möglicherweise auf den ersten Blick einen leicht messbaren, „objektiven“ Nutzen dar, aber diese funktionalen Aspekte entfalten ihre Bedeutung erst im Zusammenhang mit subjektiven – affektiven und symbolischen – Motivationen, die das autonome Fahren begleiten. Darüber hinaus spielt auch die Einbettung von instrumentellen Motiven der Nutzung eines (autonomen) Autos in einen alltagspraktischen Rahmen sowie in den Rahmen des jeweiligen sozio-technischen Systems eine Rolle: Das autonome Fahrzeug mag als sicher, flexibel und komfortabel wahrgenommen werden – zu einem tatsächlichen Nutzen wird dies aber erst dann, wenn Sicherheit, Flexibilität oder Komfort in der individuellen Alltagspraxis eine spezifische Bedeutung haben [51].

31.3 Multimethodischer Untersuchungsansatz zum autonomen Fahren in Zusammenhang mit Autonutzung und -besitz

Die Erkenntnisse aus der Forschung zu Autonutzung und -besitz und die Hinweise aus der ersten Explorationsstudie zum autonomen Fahren bilden die konzeptionelle Grundlage für die empirischen Arbeiten, die wir daran angeschlossen haben. Ziel dieser weiterführenden Untersuchungen ist, die spezifischen Zuschreibungen, die derzeit von Verkehrsteilnehmerinnen und -teilnehmern gegenüber dem autonomen Auto vorgenommen werden, anwendungsbezogen zu erheben und die „Übersetzung“ solcher Zuschreibungen in instrumentelle, affektive und symbolische Motive zu entschlüsseln. Damit heißt die forschungsleitende Frage: Welche Eigenschaften und Bewertungen verbinden Verkehrsteilnehmerinnen und -teilnehmer mit dem autonomen Fahren und dem autonomen Fahrzeug, und welche unterschiedlichen Motive sind dafür ausschlaggebend? Gleichzeitig soll der Kontext der heutigen Zuschreibungen gegenüber dem autonomen Automobil analysiert und, wo möglich, in Zusammenhang mit bestehenden Alltags- und Mobilitätspraktiken gebracht werden. Auf

diese Weise kann anschließend erfasst werden, welche Einstellungen und Bewertungen Auswirkungen auf die Akzeptanz der Technologie erwarten lassen.

Dafür wurde ein multimethodisches Vorgehen gewählt: Um mögliche Varianzen der Wahrnehmung und Bewertung zu explorieren, wurden Befragte in einer quantitativen Online-Erhebung mit spezifischen Anwendungsfällen des autonomen Fahrens konfrontiert. Ergänzend wurde im Rahmen dieser quantitativen Erhebung eine Freitext-Befragung durchgeführt – die Teilnehmerinnen und Teilnehmer hatten so die Möglichkeit, ihre ganz eigenen Zuschreibungen zum autonomen Fahren vorzunehmen. Eine tiefere Analyse mit Blick auf den Kontext, in dem autonomes Fahren derzeit wahrgenommen und bewertet wird, erlaubten entdeckende qualitative Verfahren, die parallel im Rahmen von Gruppendiskussionen durchgeführt wurden. Hier lag der Fokus insbesondere auf der Ambivalenz der Technikbewertung (s. Kap. 29) und damit auf Erwartungen einerseits und Befürchtungen andererseits für den Fall einer Implementierung der Technologie. Entdeckende qualitative Verfahren erscheinen besonders geeignet, das noch relativ neue Forschungsfeld zu beleuchten, in dem es bisher kaum Erkenntnisse über Einstellungen und Motive zum autonomen Fahren aus Nutzersicht gibt – der offene Charakter solcher Untersuchungen hilft, diese Motive zu entschlüsseln.

31.3.1 Wahrnehmung und Bewertung des autonomen Fahrzeugs in Abhängigkeit von spezifischen Anwendungsfällen

Die vier Use-Cases, die im Rahmen des Projektes entwickelt wurden (s. Kap. 2), lassen auch im Hinblick auf ihre akzeptanzrelevanten Aspekte je unterschiedliche Wahrnehmungen und Bewertungen des autonomen Fahrens erwarten, denn sie sind nicht nur mit unterschiedlichen technischen Merkmalen versehen, sondern auch mit spezifischen Implikationen, Anwendungsbereichen und Zuschreibungen assoziiert (s. hierzu auch Kap. 6, Kap. 11, Kap. 12 und Kap. 32). In einer quasi-repräsentativen Fragebogenerhebung wurden daher mithilfe der Use-Cases differenzierte Einstellungen zum autonomen Fahren erfasst. Befragt wurden dabei 1000 Personen, die hinsichtlich Geschlecht, Alter, Einkommen und Bildungsabschluss der Struktur der Gesamtbevölkerung in Deutschland entsprechen. Eine ausführliche Beschreibung der Erhebung – die in Kooperation mit mehreren Autorinnen und Autoren in diesem Buch entwickelt und durchgeführt wurde – und der Stichprobe kann in Kap. 6 nachgelesen werden.

Insgesamt haben 57 Prozent der Befragten ein generelles Interesse gegenüber dem Thema autonomes Fahren deklariert. 44 Prozent geben in einer ergänzenden Frage allerdings an, über keine Kenntnisse zum Thema zu verfügen und nur 4 Prozent bezeichnen sich selbst als gut informiert, fachkundig oder gar als Expertin bzw. Experte. Informationen zum autonomen Fahren beziehen 78 Prozent aus den Massenmedien, 64 Prozent wenden sich direkt an Experten, 56 Prozent besprechen sich mit Freunden oder Kollegen, und 40 Prozent tauschen sich in sozialen Medien aus.

Nach einem allgemeinen Teil mit Fragen zu Soziodemografie, Verkehrsverhalten, Mobilitätsbedürfnissen etc. wurden die Befragten zufällig je einem von insgesamt vier

Szenarien – basierend auf den vier Use-Cases – zugewiesen. Die Szenarien wurden ihnen dabei in Form einer Kurzbeschreibung vorgelegt:

Szenario Autobahnpiilot: Auf Autobahnen oder autobahnähnlichen Schnellstraßen kann das Fahren an das Fahrzeug übertragen werden. Die Fahrerin/der Fahrer muss in dieser Zeit nicht auf den Verkehr bzw. die Fahraufgabe achten und kann anderen Tätigkeiten nachgehen.

Szenario Autonomes Valet-Parken: Nach dem Aussteigen aller Passagiere kann das Fahrzeug allein zu einem vorher festgelegten Parkplatz fahren und von dort auch wieder zurück zu einer Abholadresse.

Szenario Vollautomatisiertes Fahrzeug: Auf Wunsch oder bei Bedarf kann das Fahren an das Fahrzeug übertragen werden. Die Fahrerin/der Fahrer muss in dieser Zeit nicht auf den Verkehr oder die Fahraufgabe achten und kann anderen Tätigkeiten nachgehen.

Szenario Vehicle-on-Demand: Ein Vehicle-on-Demand ist ein Fahrzeug, das seine Passagiere ohne Fahrerin oder Fahrer fährt. Menschen können in einem solchen Fahrzeug nicht mehr selbst fahren – im Innenraum des Fahrzeugs gibt es daher auch kein Lenkrad und keine Pedalerie mehr.

Eine an die Vorstellung des jeweiligen Use-Case angeschlossene Frage thematisierte die grundsätzliche Bereitschaft der Probanden, ihr bisher bevorzugtes Verkehrsmittel durch ein autonomes Fahrzeug zu ersetzen. Diese Frage war in der gleichen Form auch schon im ersten, allgemeinen Teil der Erhebung gestellt worden, dort allerdings relativ unspezifisch „ein autonomes Fahrzeug“ bezeichnend, ohne dass hierzu eine Erklärung gegeben wurde. Dabei zeigte sich, dass der Wunsch, sein eigenes Fahrzeug (bzw. „Lieblingsverkehrsmittel“) durch ein autonomes Fahrzeug – ob genauer spezifiziert oder nicht – zu ersetzen, bei den Befragten relativ gering ausgeprägt ist: Nur zwischen 11 und 15 Prozent können der Aussage überwiegend oder voll zustimmen (s. Abb. 31.1). Allerdings sagen 27 Prozent, dass sie es sich wenig oder gar nicht vorstellen können, das Lieblingsverkehrsmittel durch ein (nicht spezifiziertes) autonomes Fahrzeug zu ersetzen. Wird, wie in der Erhebung, autonomes Fahren in Bezug auf einen konkreten Anwendungsfall (Use-Case) erläutert, steigt der Grad der Ablehnung deutlich an (und liegt zwischen 44 und 54 Prozent). Das heißt: Die Ablehnung wird durch die Konkretisierung deutlicher zum Ausdruck gebracht. Die geringste Zustimmung ist übrigens für das Vehicle-on-Demand zu verzeichnen – 54 Prozent würden ihr präferiertes Verkehrsmittel nicht damit ersetzen wollen, und nur 11 Prozent könnten sich dies tatsächlich vorstellen.

Um zu explorieren, welche Assoziationen die Befragten in Bezug auf ein autonomes Fahrzeug derzeit vornehmen, wurden sie gebeten, in bis zu 15 Freitextfeldern mit eigenen Worten zu erklären, was sie unter einem autonomen Fahrzeug verstehen. Basis war auch hier wieder die Kurzbeschreibung (s. o.). Die folgende Auswertung bezieht sich ausschließlich auf die Antworten derjenigen Befragten, denen die Anwendungsfälle „Vollautomat mit Verfügbarkeitsfahrer“ und „Vehicle-on-Demand“ zugeordnet worden waren:

Ich kann mir vorstellen, mein bisher bevorzugtes Fahrzeug durch ein autonomes Fahrzeug zu ersetzen

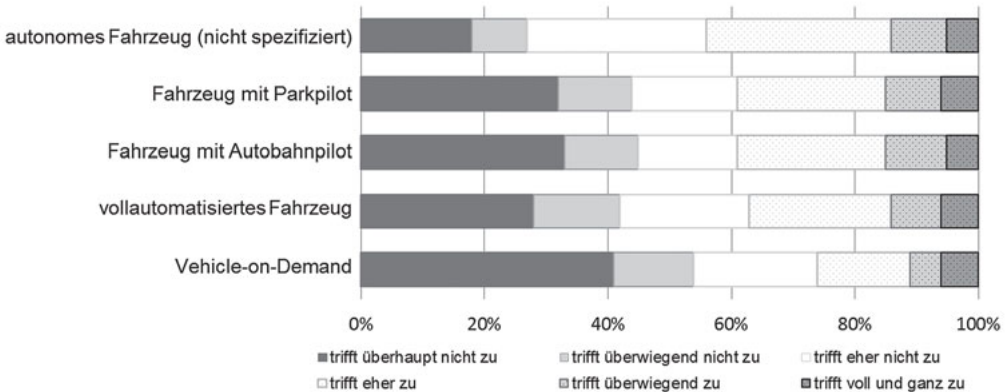


Abb. 31.1 Bereitschaft, das präferierte Verkehrsmittel durch ein autonomes Fahrzeug zu ersetzen

Die Antworten der je 250 Befragten wurden manuell zusammengefasst, kategorisiert und anschließend spezifischen Konnotationen zugeordnet (s. Abb. 31.2). Für den Anwendungsfall Vollautomat mit Verfügbarkeitsfahrer gab es insgesamt 3750 Einträge; davon waren 2587 (69 Prozent) aus verschiedenen Gründen ungültig, z. B. weil der Bezug zur Frage nicht erkennbar war. Beim Vehicle-on-Demand gab es insgesamt 3750 Einträge, von denen 2512 (67 Prozent) ungültig waren. Abbildung 31.2 zeigt die Verteilung von Aussagen mit verschiedenen Konnotationen: positiv, ambivalent, negativ oder ohne Konnotation – die ungültigen Beiträge sind dabei schon heraus gerechnet, die Prozentzahlen beziehen sich auf die verbliebenen Nennungen.

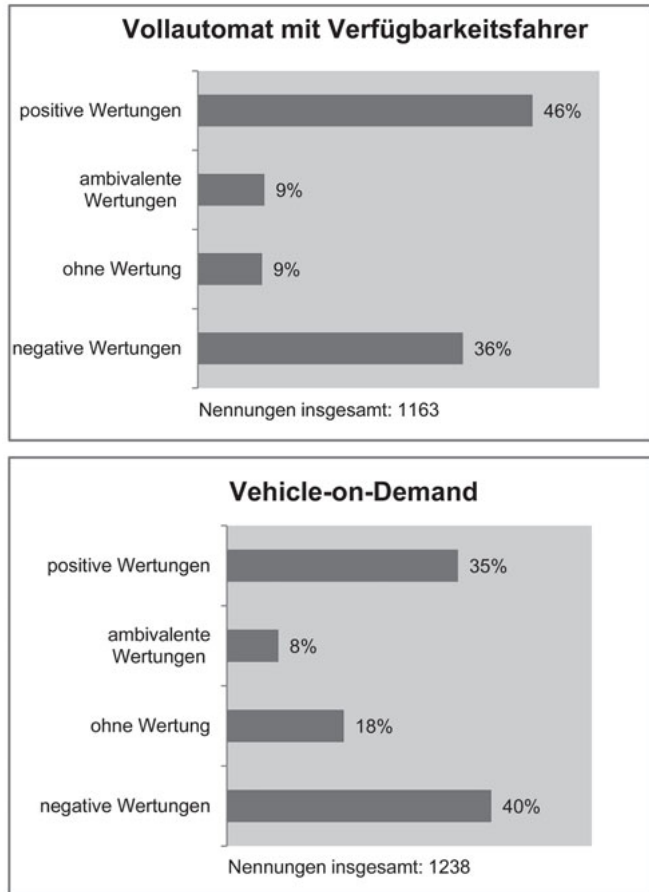
Während für den Vollautomaten mit Verfügbarkeitsfahrer eine knappe Mehrheit positiv konnotierte Beschreibungen verwendet, trifft dies nur für 35 Prozent der Begriffe beim Vehicle-on-Demand zu. 40 Prozent der Aussagen waren eher negativ konnotiert – beim Vollautomaten waren dies 36 Prozent der Begriffe. Ein kleinerer Teil der Begriffe (9 bzw. 8 Prozent) war ambivalent – d. h., solche Aussagen konnten nicht als eindeutig positiv oder negativ identifiziert werden.

Insgesamt fallen die Zuordnungen, die unabhängig voneinander jeweils dem einen (Vollautomat) oder dem anderen (Vehicle-on-Demand) Fahrzeug zugeschrieben wurden, relativ ähnlich aus; viele Antwortkategorien sind sowohl bedeutungsgleich als auch ähnlich bezüglich ihrer prozentualen Verteilung. Auf einige prägnante Unterschiede wird nachfolgend eingegangen. Außerdem werden die Zuschreibungen, wo dies sinnvoll erscheint, daraufhin geprüft, welche instrumentellen, emotionalen und symbolischen Eigenschaften dem autonomen Fahrzeug zugeschrieben werden.

Vollautomat mit Verfügbarkeitsfahrer

Im Feld „Positive Wertungen“ entfielen 17 Prozent der Aussagen auf die Antwortkategorie „bequem“, gefolgt von „gut“ (13 Prozent), „sicher“ (11 Prozent), „entspannend“ (10 Pro-

Abb. 31.2 Konnotationen zu autonomen Fahrzeugen: Vollautomat und Vehicle-on-Demand



zent) und „modern“ (10 Prozent) – in Tab. 31.1 sind diese prozentualen Verteilungen dargestellt. 8 Prozent aller Antworten im Bereich „Ambivalente Wertungen“ entfielen auf die Kategorie „Luxus“ und 15 Prozent aller Aussagen im Bereich „Negative Wertungen“ auf die Kategorie „teuer“. Nur in der Antwortkategorie „nichts für mich“ waren in diesem Bereich mit 16 Prozent mehr Aussagen vertreten. Die Kategorie „Luxus“ tritt beim Vehicle-on-Demand wiederum kein einziges Mal auf, und „teuer“ rangiert mit 7 Prozent aller Aussagen bei den negativen Wertungen nur auf Platz 7.

Im Bereich der positiven Wertungen werden mit dem Vollautomaten hauptsächlich Aspekte assoziiert, die als funktional (bzw. instrumentell) klassifiziert werden können – ein solches Fahrzeug wird als „bequem“, „sicher“, „praktisch“, „effizient“, „für Mobilitätseingeschränkte“, „eine Hilfe“, „umweltfreundlich“ und „flexibel“ beschrieben. Beim Vehicle-on-Demand wird noch der wahrgenommene Aspekt der Nützlichkeit ergänzt (dafür fehlt hier die Zuordnung „eine Hilfe“). Als deutlich emotional bzw. affektiv besetzt konnten für den Vollautomaten mit Verfügbarkeitsfahrer nur die positiven Zuschreibungen „entspannend“, „genial“ und „aufregend“ identifiziert werden, Gleiches gilt für das Vehicle-on-

Tab. 31.1 Antworten im Textfeld „Ein Vollautomat mit Verfügbarkeitsfahrer ist ...“ – zusammengefasst und kategorisiert

<i>Positiv</i>	<i>in %</i>	<i>Ambivalent</i>	<i>in %</i>	<i>Negativ</i>	<i>in %</i>
bequem	17%	die Zukunft	48%	nichts für mich	16%
gut	13%	utopisch	23%	teuer	15%
sicher	11%	gewöhnungsbedürftig	22%	unnötig	12%
entspannend	10%	Luxus	8%	unheimlich	11%
modern	10%	Gesamt: 106	100%	unsicher	11%
praktisch	9%			nicht ausgereift	9%
genial	7%	<i>Ohne Wertung</i>	<i>in %</i>	langweilig	7%
effizient	6%	autonom	29%	technikabhängig	7%
interessant	5%	keine Ahnung	20%	unberechenbar	7%
für Mobilitäts- eingeschränkte	4%	Sinn nicht verständlich	18%	gefährlich	3%
eine Hilfe	3%	ähnlich wie andere Verkehrsmittel	12%	schrecklich	1%
aufregend	2%	keine Fahrzeuge	11%	Gesamt: 422	100%
umweltfreundl.	2%	ein Auto	6%		
flexibel	2%	Verständnisfragen	5%		
Gesamt: 533	100%	Gesamt: 102	100%		

Demand („genial“ wird hier durch die schwächer konnotierten Kategorien „toll“ und „gut“ ersetzt). Im Bereich der negativen Wertungen stellt sich die Verteilung von funktional versus emotional konnotierten Aspekten dagegen umgekehrt dar: „unheimlich“, „langweilig“, „gefährlich“, „schrecklich“ (beim Vehicle-on-Demand zusätzlich: „beängstigend“) sind eindeutig affektiv besetzte Kategorien, während „teuer“ und „nicht ausgereift“ eher funktionale Aspekte bezeichnen. Antwortkategorien, die eine symbolische Konnotation vermuten lassen, finden sich in den Aussagen insgesamt kaum – am ehesten deuten noch Antworten der Kategorien „modern“, „interessant“ oder „Luxus“ darauf hin, dass ein solches autonomes Fahrzeug auch in Verbindung mit Aspekten wahrgenommen und bewertet wird, die den durch das Fahrzeug zum Ausdruck gebrachten Status betreffen.

Vehicle-on-Demand

Tabelle 31.2 zeigt die zusammengefassten und kategorisierten Zuschreibungen, wie sie für das Vehicle-on-Demand vorgenommen wurden, in ihrer prozentualen Verteilung. Die Topantwortkategorien im Feld „Positive Wertungen“ unterscheiden sich kaum von denen, die für den Vollautomaten mit Verfügbarkeitsfahrer festgestellt werden konnten: Einzig auf Platz 1 taucht mit 15 Prozent aller hier gemachten Aussagen die Kategorie „nützlich“ komplett neu auf. Außerdem beschreiben die Befragten das Fahrzeug mit „bequem“ (14 Prozent), „entspannend“ (13 Prozent), „modern“ (12 Prozent) und „sicher“ (10 Prozent). Für das

Tab. 31.2 Antworten im Textfeld „Ein Vehicle-on-Demand-Fahrzeug ist ...“ – zusammengefasst und kategorisiert

<i>Positiv</i>	<i>in %</i>	<i>Ambivalent</i>	<i>in %</i>	<i>Negativ</i>	<i>in %</i>
nützlich	15%	die Zukunft	41%	nichts für mich	16%
bequem	14%	utopisch	41%	technikabhängig	12%
entspannend	13%	gewöhnungsbedürftig	18%	unnötig	11%
modern	12%	Gesamt: 96	100%	beängstigend	10%
sicher	10%			unsicher	10%
toll	9%	<i>Ohne Wertung</i>	<i>in %</i>	unberechenbar	7%
interessant	6%	keine Ahnung	50%	teuer	7%
effizient	5%	autonom	22%	gefährlich	7%
für Mobilitäts- eingeschränkte	4%	Sinn nicht verständlich	17%	nicht ausgereift	6%
gut	4%	keine Fahrzeuge	6%	unheimlich	6%
umweltfreundlich	4%	ein Auto	2%	langweilig	5%
günstig	2%	ähnlich wie andere Verkehrsmittel	2%	schrecklich	2%
aufregend	2%	Verständnisfragen	1%	Gesamt: 493	100%
Gesamt: 431	100%	Gesamt: 218	100%		

Vehicle-on-Demand sind 18 Prozent der Zuschreibungen ohne Wertung. Von diesen 18 Prozent entfällt die Hälfte auf die Antwortkategorie „keine Ahnung“ – im Vergleich dazu erklären beim Vollautomaten mit Verfügbarkeitsfahrer nur 20 Prozent, sie hätten „keine Ahnung“. Nur 2 Prozent der Aussagen in der Sparte „ohne Wertung“ entfällt auf die Antwortkategorie „ähnlich wie andere Verkehrsmittel“ – beim Vollautomaten waren es 12 Prozent. Unter diese Kategorie waren Einträge gefasst wie „Ein Vollautomat mit Verfügbarkeitsfahrer ist ‚wie die Bahn‘“ oder „Ein Vehicle-on-Demand-Fahrzeug ist ‚ein Taxi‘“.

Immerhin ein Viertel aller negativen Aussagen entfällt beim Vehicle-on-Demand auf die emotional stark besetzten Antwortkategorien „beängstigend“ (10 Prozent), „gefährlich“ (7 Prozent), „unheimlich“ (6 Prozent) und „schrecklich“ (2 Prozent). Beim Vollautomaten wird „beängstigend“ dagegen kein einziges Mal assoziiert, und nur 15 Prozent der Aussagen bezeichnen ihn als „unheimlich“ (11 Prozent), „gefährlich“ (3 Prozent) oder „schrecklich“ (1 Prozent).

31.3.1.1 Zusammenfassung

Die Befragung macht deutlich: Insgesamt werden einem Vehicle-on-Demand am meisten negative und am wenigsten positive Bewertungen entgegengebracht. Von den 250 Befragten, die diesem Use-Case zugeteilt wurden, können sich 54 Prozent nicht vorstellen, ihr derzeit präferiertes Verkehrsmittel durch ein Vehicle-on-Demand zu ersetzen. Auch im direkten Vergleich mit einem vollautomatisierten Fahrzeug mit Verfügbarkeitsfahrer wird das

Vehicle-on-Demand mit eher negativen Aussagen beschrieben; ein Viertel aller Beschreibungen sehen ein solches Fahrzeug sogar als beängstigend, gefährlich, unheimlich oder schrecklich an. Unter einem Vehicle-on-Demand können sich die Befragten offensichtlich auch weniger vorstellen als unter einem Fahrzeug, bei dem das Selbstfahren weiterhin möglich wäre, das zeigen die zahlreichen Aussagen in der Kategorie „keine Ahnung“.

Die Antwortkategorien „teuer“ und „Luxus“, die insbesondere bzw. ausschließlich dem Vollautomaten zugeschrieben werden, lassen den Schluss zu, dass ein solches Fahrzeug noch deutlich mit dem individuellen Privatbesitz in Verbindung gebracht wird, wohingegen das Vehicle-on-Demand nur in einigen wenigen Aussagen überhaupt mit anderen Verkehrsmitteln verglichen wird.

Eine Zuordnung von Aussagen zu den autonomen Fahrzeugen zu entweder instrumentellen, affektiven oder symbolischen Aspekten ergab, dass im Bereich positiv konnotierter Wertungen instrumentelle Zuschreibungen überwiegen, während bei den negativen Wertungen stark emotional geprägte Aussagen in der Mehrheit sind. Aussagen, bei denen der Status-Charakter der autonomen Fahrzeuge im Vordergrund steht, konnten dagegen nicht eindeutig identifiziert werden. In der nachfolgend beschriebenen qualitativen Erhebung werden die wahrgenommenen negativen Aspekte des autonomen Fahrens genauer in den Blick genommen und daraufhin untersucht, in welchen sozio-technischen Kontext sie eingebettet sind. Vor allem solche ablehnenden Zuschreibungen, die bereits die Explorationsstudie zeigen (s. Kap. 29), sind stärker an offenbar subjektbezogenen und affektiven Aspekten sowie am Kontext von Autonutzung und -besitz orientiert.

31.3.2 Autonomes Fahren in der Zukunft: „Wollen wir wirklich so leben?“¹

Die folgenden Ergebnisse beruhen auf drei Gruppendiskussionen in Berlin, deren Zusammensetzungen jeweils variierten. Alle Teilnehmenden hatten einen höheren Bildungsabschluss bzw. konnten dem akademischen Bereich zugeordnet werden – sie studierten, arbeiteten an einer Universität oder an einer außeruniversitären Forschungseinrichtung. Die Diskussionen wurden mit je fünf, sechs und sieben Teilnehmenden, alle wohnhaft in Berlin, durchgeführt, darunter insgesamt sieben Frauen. In der ersten Diskussionsrunde war der Abstand zwischen jüngstem und ältestem Teilnehmer am größten; der jüngste Teilnehmer dieser Gruppe war 20 Jahre, der älteste 50 Jahre alt. Alle Teilnehmenden nutzten regelmäßig ein Auto, nicht alle besaßen eines. Am Ende der jeweiligen Diskussion wurden Daten zur Soziodemografie und zum Verkehrsverhalten sowie Kennzahlen zu Pkw-Nutzung und -Besitz erhoben. Alle Teilnehmenden hatten vor den Treffen schon einmal vom autonomen Fahren gehört.

Zu Beginn der Treffen wurde den Teilnehmerinnen und Teilnehmern ein bebildertes narratives Szenario zum autonomen Fahren in DIN-A4 Flyer-Format vorgelegt. Es gab

¹ Die Frage entstammt einem Kommentar aus den nachfolgend beschriebenen Gruppendiskussionen.

zwei unterschiedliche Szenarien – einmal zum „Vollautomaten mit Verfügbarkeitsfahrer“ und einmal zum „Vehicle-on-Demand“, zu denen pro Gruppe jeweils eines vorgelegt und im Rahmen einer gruppengestützten Introspektion verwendet wurde. Ziel einer solchen Introspektion ist es, Prozesse der „inneren Beobachtung“ explizit zu machen, also die Konzentration und Aufmerksamkeit bewusst auf innere Vorgänge zu lenken ([52], S. 493). Unter Leitung einer Forschungsperson befassen sich Teilnehmende einer Gruppe mit dem jeweiligen Forschungsgegenstand, dokumentieren dabei unabhängig voneinander ihre inneren Prozesse und Erlebnisse und teilen anschließend die durch Selbstbeobachtung gewonnenen Erfahrungen mit der Gruppe, ohne dass Wertungen und Kommentare vorgenommen werden. In einem zweiten Durchlauf können die teilnehmenden Personen – durch die gehörten Erlebnisse zu weiteren Ausführungen animiert – ihre Berichte ergänzen. Zusammen mit dem Szenario erhielten die Teilnehmenden folgende Aufforderung:

Sie erhalten nun eine kurze Szenario-Beschreibung zum Autoverkehr der Zukunft – also eine kleine Geschichte zum Thema, wie das Autofahren von morgen aussehen könnte. Bitte lesen Sie sich die Geschichte durch. Versuchen Sie, sich in das Gelesene hineinzuversetzen und denken Sie an Ihre Gefühle, Fantasien und Empfindungen – seien Sie offen für alles, was während der Auseinandersetzung mit dem Thema in Ihnen vorgeht!

Bitte machen Sie sich Notizen zu Ihrem Erleben.

Die Notizen wurden als sogenannter „Introspektionsbericht“ anschließend von den Teilnehmenden jeweils reihum vorgetragen. Die Berichte wurden später transkribiert und mittels Qualitativer Heuristik ausgewertet. Anders als die oftmals unbewusst ablaufenden Alltagsentdeckungsverfahren ist die Qualitative Heuristik „regelgeleitet und mit einer *Methodologie* versehen“ und als systematisiertes und intersubjektiv nachvollziehbares Such- und Findeverfahren ausgestaltet ([53], S. 226). Der Methode liegen vier Regeln zugrunde:

1. Offenheit der Forschungsperson/ des Subjekts,
2. Offenheit des Forschungsgegenstandes/ des Objekts,
3. maximale strukturelle Variation der Perspektiven,
4. Analyse auf Gemeinsamkeiten.

Darüber hinaus wendet die Qualitative Heuristik das sogenannte Dialogprinzip an: An einen Gegenstand (in der Untersuchung die transkribierten Introspektionsberichte) werden Fragen gestellt, auf die dieser „Antworten“ gibt – danach werden, aus einer anderen Perspektive bzw. einem weiteren Blickwinkel, neue Fragen gestellt etc. Forschungsgegenstand und Forschungsperson stehen somit in enger dialogischer Verbindung, und auch die strenge Zweiteilung zwischen (Forschungs-)Subjekt und (Forschungs-)Objekt wird auf diese Weise aufgeweicht.

Im Anschluss an die Erstellung des Introspektionsberichtes wurde die offene Gruppendiskussion gestartet, die sich an impliziten Handlungsmustern (vgl. [54]) zu Autonutzung

und -besitz orientierte. Die nachfolgende Ergebnisdarstellung fokussiert allerdings auf das, was die Teilnehmerinnen und Teilnehmer in den Introspektionsberichten zum Ausdruck brachten.

31.3.3 Ergebnisse

Die Szenarien, die den Teilnehmenden der Gruppendiskussionen vorgelegt wurden, haben großes Interesse, aber auch eine kritische Auseinandersetzung mit dem Thema angeregt. Exemplarisch werden im Folgenden Themen beschrieben, die sich bereits in der vorangegangenen, explorativen Erhebung als bedeutsam erwiesen hatten. Die Introspektionsberichte wiesen eine ambivalente Haltung gegenüber dem autonomen Fahren auf, vergleichbar zu den Ergebnissen der Untersuchung, die in Kap. 29 dargestellt wird.

Ergänzend wurde jedoch deutlicher, welche spezifischen Ängste und Sorgen in Bezug auf das autonome Fahren bestehen bzw. welcher gesellschaftliche Kontext damit assoziiert wird. Im Folgenden soll dieser ablehnende Horizont des autonomen Fahrens in den Blick genommen werden – die Ergebnisse entstammen den beiden Gruppen, die das Szenario zum „Vollautomaten mit Verfügbarkeitsfahrer“ vorgelegt bekamen.

31.3.3.1 Skepsis gegenüber einer Zukunft mit autonomen Fahrzeugen

Der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle erwähnt, dass in dem Szenario, das den Teilnehmerinnen und Teilnehmern vorgelegt wurde, die Protagonistin „Yvonne“ die Zeit, die durch die Befreiung von der Fahraufgabe zur Verfügung steht, u. a. nutzte, um in ihrem Fahrzeug Arbeitstätigkeiten nachzugehen (z. B. E-Mail-Korrespondenz). Daneben wurden zwar auch andere Tätigkeiten abgedeckt, aber der Fokus der Darstellung lag eher auf typischen Organisationstätigkeiten (Kind zur Schule bringen, Einkäufe organisieren etc.) als auf Freizeit- oder Entspannungsaktivitäten (aus dem Fenster schauen, Filme gucken, schlafen/relaxen etc.). So könnten skeptische und ablehnende Haltungen der (vor allem jüngeren) Gruppendiskussionsteilnehmer gegenüber dem autonomen Fahren möglicherweise auch der Tatsache geschuldet sein, dass das Leben in der Zukunft ohnehin schon deutlich mit strukturierten und optimierten Alltagsabläufen belegt war.

Andererseits lassen sich die Eigenschaftszuschreibungen des autonomen Fahrens, die von den Teilnehmenden vorgenommen wurden, klar in die vorangegangenen Erhebungen einordnen: Sowohl bei der Explorationsstudie als auch bei der quantitativen Befragung tauchten immer wieder die gleichen Zuschreibungen auf.

Die „beschleunigte Leistungsgesellschaft“

Dass man seine Zeit in einem autonomen Fahrzeug künftig mit anderen Tätigkeiten verbringen könnte, wurde in den Diskussionen mehrheitlich negativ assoziiert. Die Teilnehmerinnen und Teilnehmer äußerten in ihren mündlich vorgetragenen Introspektionsberichten die Sorge, dass sich durch die Möglichkeit, künftig im Auto nicht mehr auf die Fahraufgabe konzentriert sein zu müssen, Privat- bzw. Freizeit- und Arbeitstätigkeiten zu

stark miteinander vermischen würden – dass also die Technologie letztlich einen Trend vorantreiben könnte, den viele heute schon als bedenklich identifizierten: eine immer stärker an Leistung und Effizienz orientierte Gesellschaft:

Johanna²: „Und dass sich immer mehr das Privatleben und das Arbeitsleben vermischt und man zum totalen Workaholic wird.“

Timo: „Größer wird diese Belastung, gleichzeitig immer mehr Dinge am selben Ort tun zu müssen.“

Aus der Freiheit und der Möglichkeit, sich während der Autofahrt anderweitig zu beschäftigen, würde damit ein Druck, solch eine Beschäftigung in den Dienst der Effizienz zu stellen. Demgegenüber wurde die Aufgabe, sich konzentrieren zu müssen, beim konventionellen Autofahren als etwas Positives dargestellt:

Johanna: „Das ist ja eigentlich auch was Schönes beim Autofahren, dass man sich auf diese Sache jetzt konzentrieren muss und auch was mit den Händen macht und eben nicht schon die E-Mails von der Arbeit checkt. Das fängt erst an, wenn man im Büro sitzt.“

„Diese Abhängigkeit von der Technik“

Eine weitere Konsequenz, die mit dem autonomen Fahren in Zusammenhang gebracht wird, ist eine künftige Technikabhängigkeit, die in der Folge auch mit einem stärkeren, als negativ empfundenen Kontrollverlust einhergehen könnte. Technikabhängigkeit und Kontrollverlust werden auch deshalb als problematisch empfunden, weil Skepsis gegenüber der Zuverlässigkeit der Technologie besteht, in deren Entscheidungen man dann aber nicht mehr eingreifen könnte:

Nico: „Dass man in bestimmten Situationen einfach spontan entscheiden kann und es viel besser im Gefühl hat als vielleicht das Auto.“

Julian: „Und offenbar kann man da auch nicht sofort eingreifen, wenn ich erstmal 5, 4, 3, 2, 1...Piep hören muss.“

Hinter solchen Sorgen steht offenbar eine grundlegende Skepsis gegenüber Technologie, umso mehr, als sie, wie im Falle des autonomen Fahrens, stark in die individuelle Sicherheit eingreift:

Julian: „Ich vertraue noch nicht einmal meinem Wasserkocher blind, warum sollte ich dann meinem Auto mit meinem Leben blind vertrauen? Das fände ich irgendwie unglaublich befremdlich.“

2 Die Namen der Teilnehmerinnen und Teilnehmer wurden geändert, um deren Anonymität zu gewährleisten.

Das Leben wird „entspaßt“ und „du wirst träge“

Der Wegfall der Fahraufgabe beim autonomen Fahrzeug wird durchaus kritisch gesehen. Damit verbunden ist vor allem die Vorstellung, ein Fahrzeug, in dem man nicht selbst fährt, würde Spaß, Spontaneität, Individualität, Flexibilität und Kontrolle beschneiden (interessant ist in diesem Zusammenhang allerdings, dass die Teilnehmenden ja eigentlich den Vollautomaten mit Verfügbarkeitsfahrer vorgelegt bekommen hatten, bei dem – dies ist auch im Szenario beschrieben – die Fahrerin oder der Fahrer durchaus noch selbst fahren kann, wenn sie oder er das möchte):

Johanna: „Was ist eigentlich dann noch der Unterschied zu den öffentlichen Verkehrsmitteln? Denn am Auto schätze ich eigentlich immer, dass ich das selbst in der Hand habe, dass ich das selbst einschätzen kann. Und wenn ich halt zu spät bin, dann drücke ich ein bisschen aufs Gas.“

Die „Entspañung“ (Timo) bezieht sich einerseits ganz konkret auf den Verlust des Fahrspaßes, aber auch auf den Lebensstil, der durch autonomes Fahren entspaßt werden könnte:

Bettina: „Diese Bewegung fällt ja dann weg, weil du kannst dich überall von dem Auto abholen lassen; du wirst faul, du wirst träge, du fährst nur noch mit dem Auto, weil es ja egal ist, ob du dich krank fühlst oder nicht oder wie es dir geht – du kannst ja alle Wege mit dem Auto machen.“

Soziale Isolation: „Kein Mensch braucht den Menschen mehr“

Die Konsequenz aus einer solchen „Entspañung“ und Trägheit ist aus Sicht der Gruppendiskussionsteilnehmer, dass der Mensch schlussendlich ersetzt würde: „*Kein Mensch braucht den Menschen mehr*“ (Inga), für alles würde es dann eine Maschine geben, und auch das Denken würde einem auf diese Weise abgenommen werden:

Inga: „Das Auto fährt, man muss nicht mehr selbst fahren. Das Essen wird irgendwie geliefert, man hockt so ein bisschen autistisch in seiner Wohnung und verstumpft, muss nicht mehr denken, googelt oder lässt sich von Katzenvideos berieseln. Also man verblödet einfach komplett.“

Systemschwächen: Wie „autonom“ sind autonome Autos eigentlich?

Das Vertrauen in die Sicherheit von autonomen Fahrzeugen scheint insgesamt noch eher gering ausgeprägt zu sein. Das verleitet die Teilnehmenden zu umfassenden Spekulationen: „*Wie berechenbar sind denn die Autos?*“ und „*Wenn das System ausfällt und das Internet keine Verbindung hat?*“ (Nico), „*Ob Fernsteuerung möglich ist?*“ (Thorsten), „*Was passiert, wenn dieses System jetzt gehackt wird?*“ und „*Können diese autonomen Autos auch wirklich autonom sein?*“ (Bettina), „*Woher denn eigentlich die Aussage, dass das Ganze sicher sein soll?*“ (Herta).

Hinter solchen Fragen und Aussagen steckt eine große Unsicherheit in Bezug auf die noch unbekanntere Technologie und die Möglichkeit, dass mit ihr auch Gefahren verbunden sind. Gleichzeitig scheint den Teilnehmerinnen und Teilnehmern der Gruppendiskussionen derzeit überhaupt nicht klar, wer hinter der Entwicklung dieser Technologie steckt bzw. wer verantwortlich für die Sicherheit des Systems ist – wer würde bei einem Unfall haften? Wer übernimmt den Schaden? Und am wichtigsten: Wer übernimmt auch die ethische Verantwortung?

„Soziale und wirtschaftliche Folgen“

Mit der Auseinandersetzung um autonomes Fahren geht auch die Sorge einher, dass durch die Technologie Arbeitsplätze in unterschiedlichen Bereichen (Automobilindustrie, Taxi-Dienstleister, Lieferdienste etc.) abgebaut würden – damit ist auch die Vorstellung verbunden, dass es durch autonome Fahrzeuge weniger Vielfalt im Bereich der Automobillandschaft gäbe, „wenn es nur dieses große Eine gibt“ (Bettina), dass autonomes Fahren letztendlich eine „krassere Monopolisierung“ (Eddie) mit sich bringen würde.

31.3.4 Zusammenfassung

Die Aspekte, die in den Gruppendiskussionen im Hinblick auf autonomes Fahren thematisiert wurden, sind in einen sozio-technischen Zusammenhang eingebettet, der gleichzeitig negative und problemzentrierte Vorstellungen über eine künftige Gesellschaft enthüllt. Insgesamt stehen die Teilnehmenden dem autonomen Fahren eher ablehnend gegenüber. Zwar werden auch positive Aspekte der Technologie wahrgenommen. Diese sind jedoch weder in einen konkreten Nutzungszusammenhang eingebettet, noch mit positiven Vorstellungen über eine zukünftige Gesellschaft verbunden – zumindest nicht in dem Ausmaß wie mit negativen Vorstellungen.

Befürchtungen, die im Hinblick auf eine Zukunft mit autonomem Fahren geäußert werden, betreffen soziale Isolation, soziale und wirtschaftliche Folgen, Technikabhängigkeit, zunehmende Trägheit und den Druck, in einer vor allem auf Leistung ausgerichteten Gesellschaft mithalten zu müssen.

31.4 Fazit

Die Ergebnisse aus der quantitativen Befragung stellen die derzeit weit verbreitete Annahme, das autonome Fahren lasse eine generelle Offenheit und eine hohe Akzeptanz erwarten (vgl. [55], [56], [57]), infrage: Zwar zeigt sich eine solche Offenheit auch in unserer Untersuchung dort, wo nicht weiter spezifiziert wird, was ein autonomes Fahrzeug ist. Werden den Befragten jedoch konkrete Anwendungsfälle (Use-Cases) des autonomen Fahrens vorgestellt, fallen die Wertungen deutlich negativer aus. Vor allem die Bewertungen in Bezug auf das Vehicle-on-Demand lassen vermuten, dass einige Ausprägungen des autonomen Fahrens derzeit noch relativ „weit weg“ sind von konkreteren Vorstellungen zu

einem Fahrzeug, aber auch von Vorstellungen zur Art der Fortbewegung. Die negative Bewertung lässt sich u. a. damit erklären, dass sich die Menschen möglichen Risiken und Gefahren, die im Zusammenhang mit einem Vehicle-on-Demand auftreten könnten, eher „ausgesetzt“ fühlen, als dass sie diese bewusst „steuern“ können – denn selbst steuern ist bei einem solchen Fahrzeug ja gar nicht mehr möglich (zum Thema Risikobewertung s. auch Kap. 30). Insgesamt ist derzeit fraglich, ob sich die meisten Menschen überhaupt etwas unter „autonomen Fahren“ vorstellen können – immerhin 44 Prozent der Befragten in der quantitativen Erhebung haben angegeben, nichts über das autonome Fahren zu wissen. Dies zeigt deutlich, dass das Thema bei Weitem noch nicht überall angekommen ist. Die Ergebnisse können auch als Hinweis verstanden werden, künftig stärker nutzungs- und anwendungsbezogene Untersuchungen zum autonomen Fahren durchzuführen.

Besonders die negativen Assoziationen mit dem autonomen Fahren bzw. dem autonomen Fahrzeug lassen darüber hinaus erahnen, dass eine *nutzenorientierte* Betrachtung auch spezifische *Nutzergruppen* adressieren muss. So sollten Szenarien, mit denen gearbeitet wird, noch stärker die Lebenswelt und das Relevanzsystem der unterschiedlichen Nutzerinnen und Nutzer berücksichtigen. Klar wurde in diesem Zusammenhang zumindest, dass das Vertrauen gegenüber der noch relativ unbekanntem Technologie derzeit eher gering ausgeprägt ist – dass autonome Fahrzeuge überhaupt sicher sein können, wird in Zweifel gezogen. Gleichzeitig gibt es momentan weder eine konkrete Vorstellung davon, was die Technologie leisten kann, noch davon, wer hinter der Entwicklung steht und im Zweifelsfall die Verantwortung, u. a. bei möglichen Schäden, übernehmen würde.

Die vorliegenden Ausführungen haben vor allem den „subjektiv gemeinten Sinn“ bzw. das reflexive oder theoretische Wissen ([54], S. 40 ff., [58], S. 10 ff.) des autonomen Fahrens, aber auch der Autonutzung in den Blick genommen: Ziel war dabei, die reflexive Auseinandersetzung, also die Motive der handelnden Personen herauszuarbeiten und zu fragen: Welchen Sinn macht die Autonutzung aus subjektiver Perspektive, was denken sich die Menschen dabei, welche Intentionen liegen ihrem Handeln zugrunde? Diese Sinnenebene bildet das „Orientierungsschema“ der handlungsleitenden Wissensstruktur. In künftigen empirischen Arbeiten wird es auch notwendig sein, den Orientierungsrahmen, d. h. die Struktur des Handelns zu entschlüsseln und zu fragen, wie die Praxis der Autonutzung milieu- und kulturspezifisch hergestellt wird.

Ob durch das autonome Fahren ein fundamentaler Wandel im System der Automobilität ausgelöst werden wird, ist derzeit noch kaum abzusehen – bisher deutet wenig darauf hin, dass die Hegemonie der Autonutzung ernsthaft gefährdet wäre. Nichtsdestotrotz könnte es letztendlich gerade eine neue Technologie wie das autonome Fahren sein, die unser Mobilitätssystem nachhaltig und unumkehrbar transformiert – dazu der Soziologe John Urry: „Just as the internet and the mobile phone came from ‚nowhere‘, so the tipping point here will emerge unpredictably, probably from a set of technologies or firms or governments not currently a center of the mobility industry and culture.“ ([59], S. 272)

Literatur

1. Anker, S.: Ist das die Zukunft unserer Mobilität? Die Welt. <http://www.welt.de/debatte/kommentare/article128675822/Ist-das-die-Zukunft-unserer-Mobilitaet.html> (2014). Zugegriffen: 30. September 2014
2. Heise online: Autonome Autos machen Privat-Pkw überflüssig. <http://www.heise.de/newsticker/meldung/Autonome-Autos-machen-Privat-Pkw-ueberfluessig-1943508.html> (2014). Zugegriffen: 30. September 2014
3. Der Stern/DPA: So sollen Roboter-Autos den Verkehr revolutionieren. [stern.de http://www.stern.de/auto/news/google-car-so-sollen-roboter-autos-den-verkehr-revolutionieren-2122143.html](http://www.stern.de/auto/news/google-car-so-sollen-roboter-autos-den-verkehr-revolutionieren-2122143.html) (2014). Zugegriffen: 30. September 2014
4. Hucko, M.: Carsharing mit selbst fahrenden Autos: Daimler eifert Google nach. Spiegel Online <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/daimler-autobauer-plant-car-sharing-mit-autonom-fahrenden-smarts-a-980962.html#ref=rss> (2014). Zugegriffen: 30. September 2014
5. Sheller, M.: The Emergence of New Cultures of Mobility: Stability, Openings, and Prospects. In: R. Kemp et al. (Hrsg.) *Automobility in transition? A socio-technical analysis of sustainable transport*, S. 180–202. Routledge, London (2011)
6. Gardner, B., Abraham, C.: What drives car use? A grounded theory analysis of commuters' reasons for driving. *Transportation Research Part F* 10, 187–200 (2007)
7. Ladd, B.: *Autophobia. Love and Hate in the Automotive Age*. The University of Chicago Press, Chicago (2008)
8. Miller, D.: *Car Cultures*. Berg, Oxford / New York (2001)
9. Curtis, C., Low, N.: *Institutional Barriers to Sustainable Transport*. Ashgate, Farnham (2012)
10. Sandoval, J.S.O., Cervero, R., Landis, J.: The transition from welfare-to-work: How cars and human capital facilitate employment for welfare recipients. *Applied Geography* 31, 352–362 (2011)
11. Urry, J.: The 'System' of Automobility. *Theory, Culture & Society* 21, 25–39 (2004)
12. Geels, F.: The Dynamics of Transitions in Socio-technical Systems : A Multi-level Analysis of the Transition Pathway from Horse-drawn Carriages to Automobiles. *Technology Analysis & Strategic Management* 17, 445–476 (2005)
13. Sheller, M., Urry, J.: The City and the Car. *International Journal of Urban and Regional Research* 24, 737–757 (2000)
14. Stotz, G.: The Colonizing Vehicle. In: Miller, D.: *Car Cultures*, S. 223–244. Berg, Oxford / New York (2001)
15. Sheller, M.: Automotive Emotions: Feeling the Car. *Theory, Culture & Society* 21, 221–242 (2004)
16. Dant, T.: The Driver-car. *Theory, Culture & Society* 21, 61–79 (2004)
17. Thrift, N.: Driving in the city. *Theory, Culture & Society* 21, 41–59 (2004)
18. Bergstad, C.J., Gamble, A., Hagman, O., Polk, M., Gärling, T., Olsson, L.E.: Affective-symbolic and instrumental-independence psychological motives mediating effects of socio-demographic variables on daily car use. *Journal of Transport Geography* 19, 33–38 (2011)
19. Williams, A.M., Shaw, G.: Future play: tourism, recreation and land use. *Land Use Policy* 265, 5326–5335 (2009)
20. Macintyre, S., Ellaway, A., Der, G., Ford, G., Hunt, K.: Do housing tenure and car access predict health because they are simply markers of income or self esteem? A Scottish study. *Epidemiol Community Health* 52, 657–664 (1998)
21. Brownstone, D., Small, K.A.: Valuing time and reliability: assessing the evidence from road pricing demonstrations. *Transportation Research Part A: Pol. Pract.* 39, 279–293 (2005)
22. Bamberg, S., Ajzen, I., Schmidt, P.: Choice of travel mode in the theory of planned behaviour: the role of past behaviour, habit, and reasoned action. *Basic and Applied Social Psychology* 25, 175–188 (2003)

23. Li, Z.L., Hensher, D.A.: Congestion charging and car use: A review of stated preference and opinion studies and market monitoring evidence. *Transport Policy* 20, 47–61 (2012)
24. Litman, T.: Build for comfort, not just speed: valuing service quality impacts in transportation planning. Victoria Transport Policy Institute (2008)
25. Newman, P., Kenworthy, J.: Urban Design to Reduce Automobile Dependence. *Opolis* 2, 35–52 (2006)
26. Ewing, R.; Cervero, R.: Travel and the built environment. *Journal of the American Planning Association* 76, 265–294 (2001)
27. Mokhtarian, P. L., Salomon, L.: How derived is the demand for travel? Some conceptual and measurement considerations. *Transport Research Part A* 35, 695–719 (2001)
28. Steg, L., Vlek, C., Slotegraaf, G.: Instrumental-reasoned and symbolic-affective motives for using a motor car. *Transportation Research Part F* 4, 151–169 (2001)
29. Steg, L.: Car use: lust and must. Instrumental, symbolic and affective motives for car use. *Transportation Research A* 39, 147–162 (2005)
30. Gatersleben, B.: Psychological Motives for Car Use. In: T. Gärling et al. (eds.), *Handbook of Sustainable Travel*, S. 85–94. Springer, Dordrecht (2013)
31. Gatersleben, B., Uzell, D.: The journey to work: Exploring commuter mood among driver, cyclists, walkers and users of public transport. *Environment and Behaviour* 39, 416–431 (2007)
32. Ellaway, A., Macintyre, S., Hiscock, R., Kearns, A.: In the driving seat: psychological benefits from private motor vehicle transport compared to public transport. *Transportation Research Part F* 6, 217–231 (2003)
33. Lois, D, López-Sáez, M.: The relationship between instrumental, symbolic and affective factors as predictors of car use. *Transportation Research Part A* 43, 790–799 (2009)
34. Steg, L.; Vertoolen, L. G.J.: Affective motives for car use. In: *European Transport Conference: Transport, Planning, Policy and Practice*, Cambridge, London (1999)
35. Kent, J.: Secured by automobility: why does the private car continue to dominate transport practices? Dissertation, University of New South Wales, Australia (2013)
36. Freudendahl-Pedersen, A.: *Mobility in Daily Life – Between Freedom and Unfreedom*. Ashgate, Farnham (2009)
37. Laurier, E., Lorimer, H., Brown, B., Jones, O., Juhlin, O., Noble, A., Perry, M., Pica, D., Sormani, P., Strebel, I., Swan, L., Taylor, A., Watts, L., Weilenmann, A.: Driving and “passenger”: Notes on the ordinary organization of car travel. *Mobilities* 3, 1–23 (2008)
38. Schuitema, G., Anable, J., Skippon, S., Kinnear, N.: The role of instrumental, hedonic and symbolic attributes in the intention to adopt electric vehicles. *Transportation Research Part A* 48, 39–49 (2013)
39. Freund, P., Martin, G.: The social and material culture of hyperautomobility: “Hyperauto”. *Bull. Sci. Technol. Soc.* 29, 476–482 (2009)
40. Sheller, M., Urry, J.: The new mobilities paradigm. *Environ. Plann. A* 38, 207–226 (2006)
41. Gilroy, P.: Driving While Black. In: Miller, D.: *Car Cultures*, S. 81–104. Berg, Oxford/New York (2001)
42. Dowling, R.: Cultures of mothering and car use in suburban Sydney: a preliminary investigation. *Geoforum* 31, 435–353 (2000)
43. Augé, M.: *Non-Places. Introduction to an Anthropology of Supermodernity*. Verso, London (1995)
44. Baumann, Z.: *44 Letters from the Liquid Modern World*. Polity Press, Cambridge (2010)
45. Laurier, E.: Doing office work on the motorway. *Theory, Culture, Society* 21, 261–277 (2004)
46. Laurier, E., Dant, T.: What We Do Whilst Driving: Towards the Driverless Car. In: Grieco, M., Urry, J.: *Mobilities: New perspectives on transport and society*, S. 223–243. Ashgate, New York / London (2012)

47. Mann, E. & Abraham, C.: The role of affect in UK commuters' travel mode choices: An interpretative phenomenological analysis. *British Journal of Psychology* 97, 155–176 (2006)
48. Jain, J., Lyons, G.: The gift of travel time. *Journal of Transport Geography* 16, 81–89 (2008)
49. Jones, P., Thoreau, R., Massot, M.-H., Orfeuil, J.-P.: The Impact of Differences in Commuting Duration on Family Travel and Activity Patterns in the London and Paris Regions. In: Grieco, M., Urry, J.: *Mobilities: New perspectives on transport and society*, S. 179–205. Ashgate, New York / London (2012)
50. Kuhnimhof, T., Zumkeller, D., Chlond, B.: Who Made Peak Car, and How? A Breakdown of Trends over Four Decades in Four Countries. *Transport Reviews* 33, 325–342 (2013)
51. Kent, J.: Driving to save time or saving time to drive? The enduring appeal of the private car. *Transportation Research Part A*. 65, 103–115 (2014)
52. Witt, H.: Introspektion. In: Mey, G., Mruck, K. *Handbuch Qualitative Forschung in der Psychologie*, S. 491–505. VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden (2010)
53. Kleining, G.: *Lehrbuch Entdeckende Sozialforschung. Von der Hermeneutik zur qualitativen Heuristik*. Psychologie Verlags Union, Weinheim (1995)
54. Bohnsack, R., Marotzki, W., Meuser, M. (Hrsg.): *Hauptbegriffe Qualitativer Sozialforschung*. Barbara Budrich, Opladen & Farmington Hills (2011)
55. Continental AG: Continental Mobilitätsstudie. http://www.continental-corporation.com/www/download/presseportal_com_de/allgemein/automatisiertes_fahren_de/ov_mobilitaetsstudie_2013/download_channel/praes_mobilitaetsstudie_de.pdf (2013) Zugegriffen: 30.09.2014
56. AutoScout24 GmbH: Unser Auto von morgen 2013/14 <http://ww2.autoscout24.de/special/unserauto-von-morgen--2013-14/was-wuenschen-sichdie-europaeer-vom-auto-von-morgen/4319/392974/> (2013) Zugegriffen: 30.09.2014
57. AutoScout24 GmbH: Unser Auto von morgen. Studie zu den Wünschen der Europäer an das Auto von morgen about.autoscout24.com/de-de/au-press/2012_as24_studie_auto_v_morgen_en.pdf (2012) Zugegriffen: 30.09.2014
58. Bohnsack, R., Nentwig-Gesemann, I., Nohl, A.: *Dokumentarische Methode und ihre Forschungspraxis*. VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden (2013)
59. Urry, J.: Climate change, travel and complex futures. *The British Journal of Sociology* 59, 261–279 (2008)

David M. Woisetschläger

Inhaltsverzeichnis

32.1 Einleitung	710
32.2 Theoretische Grundlagen	711
32.2.1 Akzeptanzforschung zu technologiemedierten Dienstleistungen und Dienstleistungsrobotern	711
32.2.2 Akzeptanzforschung zum automatisierten Fahren	713
32.3 Konzeptionelles Modell	714
32.3.1 Markenstärke und weitere Einflussfaktoren als Treiber der Kaufentscheidung ...	714
32.3.2 Zur Bedeutung von Markenallianzen im Kaufverhalten	716
32.3.3 Anwendungsfälle des automatisierten Fahrens und ihre Bedeutung für die Kaufbereitschaft	716
32.4 Beschreibung der Erhebung	717
32.5 Studie 1	717
32.5.1 Design der Studie, Datenerhebung und Operationalisierung der Konstrukte	717
32.5.2 Ergebnisse	719
32.6 Studie 2	722
32.6.1 Design der Studie, Datenerhebung und Operationalisierung der Konstrukte	722
32.6.2 Ergebnisse	722
32.7 Studie 3	724
32.7.1 Design der Studie, Datenerhebung und Operationalisierung der Konstrukte	724
32.7.2 Ergebnisse	725
32.8 Zusammenfassung und Ausblick	727
Literatur	729

D. M. Woisetschläger (✉)
TU Braunschweig, Institut für Automobilwirtschaft und Industrielle Produktion, Deutschland
d.woisetschlaeger@tu-braunschweig.de

32.1 Einleitung

Die vom rasanten Fortschritt in der Informationstechnologie [10], [11] getriebene Entwicklung von automatisierten, selbstfahrenden Fahrzeugen ist eines der größten unternehmerischen Vorhaben der Automobilindustrie im 21. Jahrhundert. Die Automobilhersteller und ihre Zulieferer versprechen sich von den technologischen Innovationen auf dem Gebiet des automatisierten Fahrens einen positiven Beitrag zur Profitabilität von Fahrzeugen [46], steigert die Integration als optionales Ausstattungsmerkmal doch den Ergebnisbeitrag jedes verkauften Fahrzeugs. Darüber hinaus legen die automatisierten Fahrfunktionen die Grundlage für neue Geschäftsmodelle wie beispielsweise erweiterte Navigationslösungen. Branchenexperten äußern sich eher zurückhaltend auf die Frage, wann das vollautomatisiert fahrende Automobil für den Massenmarkt verfügbar ist, meist wird die Mitte des 21. Jahrhunderts als realistische Zielmarke angepeilt [42], [45]. Tatsächlich verläuft die Einführung automatisierter Fahrfunktionen eher graduell, so werden bereits seit einigen Jahren Assistenzfunktionen wie die automatische Distanzregelung oder Spurassistenten angeboten [43], [50], [64], [66], die sich bereits reger Nachfrage erfreuen. Zum Teil vielversprechende Marktprognosen suggerieren darüber hinaus eine grundsätzliche Offenheit der Kunden gegenüber selbstfahrenden Fahrzeugen [51]. Neben den etablierten Akteuren aus der Automobilbranche setzen daher auch Technologiekonzerne wie Google große Erwartungen in das prognostizierte Potenzial des automatisierten Fahrens [36], [37], [43].

Das Eintreten von Technologiekonzernen in den Automobilmarkt stellt für die etablierten Hersteller durchaus eine Bedrohung dar [58], erfordern die Funktionen des automatisierten Fahrens doch andere organisationale Fähigkeiten im Bereich der Informationstechnologie und schnellere Innovationszyklen – beides Domänen, die eher von Technologiekonzernen als von Automobilherstellern verkörpert werden. Neuste Branchenstudien zeigen sogar, dass Google als neuer Marktteilnehmer diejenige Marke ist, die mit Abstand am meisten mit selbstfahrenden Automobilen assoziiert wird [37]. Darüber hinaus erhalten sogar fiktive Fahrzeuge von Technologiekonzernen in Konsumentenstudien bereits ähnlich hohe Erwägungswerte wie etablierte Automobilhersteller [37]. Daher ist die Automobilbranche einerseits aufgrund des Bedrohungspotenzials der möglichen neuen Marktteilnehmer in Aufruhr und um die Verteidigung ihrer derzeitigen Marktpositionen bemüht. Andererseits versprechen Kooperationen mit Technologiekonzernen die Möglichkeit der Differenzierung ihrer Marken vom Wettbewerb und dies insbesondere dann, wenn die Partnerschaften selektiv oder exklusiv sind. Meldungen über Kooperationsgespräche wie zwischen Audi und Apple weisen in diese Richtung.

Parallel zu dieser Entwicklung wird die Rolle der Marke als kritischer Erfolgsfaktor in der Automobilindustrie in zahlreichen Studien hinterfragt. Diese gehen davon aus, dass die symbolische Bedeutung von Automobilen rückläufig ist und Produkte wie Smartphones zumindest in jüngeren Kundensegmenten das Auto in seinem Stellenwert verdrängen [12]. Die Verbreitung und zunehmende Popularität von zugangsbasierten Mobilitätsdienstleistungen wie dem Carsharing implizieren zudem einen Trend zu einer zunehmend utilitaristischen Perspektive auf Automobile [57]. Trotzdem bleiben zahlreiche Faktoren, die

zur großen Bedeutung der Markenstärke im Automobilbereich führen, unabhängig von potenziellen Veränderungen in der Präferenzhierarchie von Produktkategorien im Zeitverlauf bestehen. Dies ist nicht zuletzt darauf zurückzuführen, dass die Bedeutung der Marke als Einflussgröße der Kaufentscheidung generell hoch ist, wenn der Kauf oder die Nutzung mit einem hohen Risiko, Informationsasymmetrie und symbolischer Bedeutung verbunden wird [34].

In der bestehenden wissenschaftlichen Literatur existieren umfassende konzeptionelle Modelle, die eine Bewertung der relativen Bedeutung der Marke als Einflussfaktor des Kaufverhaltens von Konsumgütern ermöglichen. Im vorliegenden Spitzentechnologiekontext ist jedoch unklar, welche Bedeutung dem Markenwissen in der Bewertung von Produkten zukommt. In gleicher Weise besteht in der Marketingforschung ein umfassendes Verständnis über die Wirkung unterschiedlicher Markenstrategien wie die Nutzung von Markenerweiterungen (beispielsweise bei der Einführung neuer Dienstleistungen), die Wirkung von Markenallianzen [68] und zum Einfluss von Neuprodukteinführungen auf die Wahrnehmung der Dachmarke [2]. Untersuchungen zur Rolle der Marke für die Vermarktung von Hochtechnologieprodukten wie automatisierten Fahrtechnologien sind jedoch nicht vorhanden.

Vor diesem Hintergrund leistet das vorliegende Kapitel erstens durch die Entwicklung eines konzeptionellen Rahmens, in dem die relevanten Treiber und Konsequenzen der Kaufintention unter besonderer Berücksichtigung markenpolitischer Instrumente im Kontext des automatisierten Fahrens strukturiert werden, einen Beitrag zur bestehenden Forschung. Zweitens wird die relative Bedeutung der Markierung automatisierter Fahrtechnologien durch Automobilhersteller oder Technologiekonzerne vergleichbarer Markenstärke empirisch untersucht. Drittens wird analysiert, wie die Einführung von automatisierten Fahrtechnologien durch eine Markenallianz aus Automobilhersteller und Technologiekonzern wahrgenommen wird. Viertens wird untersucht, wie potenzielle Kunden alternative Anwendungsfälle des automatisierten Fahrens beurteilen. Basierend auf den Ergebnissen der empirischen Studien werden Implikationen für die Unternehmenspraxis und die Wissenschaft abgeleitet.

32.2 Theoretische Grundlagen

32.2.1 Akzeptanzforschung zu technologiemedierten Dienstleistungen und Dienstleistungsrobotern

Das vergleichsweise neue Forschungsfeld des assistierten und automatisierten Fahrens wurde bislang vornehmlich hinsichtlich technologischer, rechtlicher, politischer und ethischer Fragestellungen untersucht (vgl. beispielsweise [5], [7], [14], [26], [27], [28], [30], [35], [41], [48], [52], [55], [62]). Automatisiertes Fahren wird definiert als Übergabe der Fahrkontrolle vom Fahrer an das Fahrzeug [63], wobei das Ausmaß des automatisierten Fahrens vom Umfang der Fahrzeugautomatisierung abhängt. Die US-amerikanische

National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) definiert fünf Stufen des automatisierten Fahrzeugs basierend auf der Verteilung der Kontrolle zwischen Fahrer und Fahrzeug. In der höchsten Stufe vollzieht das Fahrzeug alle Fahrfunktionen, überwacht die Sicherheit und die Umgebungsbedingungen während der gesamten Fahrt und entbindet somit den Fahrer von jeglichen Aufgaben [63]. Diese Vision des vollständigen automatisierten Fahrens wird hinsichtlich des Geschäftspotenzials, der Verkehrssicherheit und der Verkehrssteuerung für sehr vielversprechend gehalten [21]. Daher investieren neben den Automobilherstellern auch Technologiekonzerne wie Apple oder Google in die kontinuierliche Verbesserung von Assistenz- und Automatisierungstechnologien. Während diese Entwicklung aus Konsumentensicht ebenfalls viele positive Aspekte beinhaltet, legen erste wissenschaftliche Untersuchungen jedoch nahe, dass Konsumenten auch starke Vorbehalte gegenüber automatisierten Fahrtechnologien haben [25].

Auch wenn in der wissenschaftlichen Literatur relativ wenige Arbeiten existieren, welche die konsumentenseitige Wahrnehmung von automatisierten Fahrtechnologien untersuchen (beispielsweise [51]), lassen sich doch aus anderen Kontexten wie beispielsweise Studien zur Akzeptanz von Selbstbedienungstechnologien und Dienstleistungsrobotern Nutzenbestandteile und Barrieren identifizieren, die aus Konsumentensicht mit der Verlagerung der Kontrolle vom Menschen hin zur Technologie verbunden sind.

Die meisten Forschungsarbeiten zur Kundenakzeptanz von technologiebasierten Innovationen nutzen das „Technology Acceptance Model“ in einer der zahlreichen publizierten Varianten [8], [15], [16], [17], [47], [60], [65], [67]. Vier zentrale Einflussfaktoren werden als Antezedenzien von Kundenakzeptanz und dem daraus folgenden Verhalten konzeptualisiert. Der erste Faktor, die Leistungserwartung, bezieht sich auf den wahrgenommenen Nutzen der Technologie. Die zweite Variable, der wahrgenommene Aufwand, kann als Einfachheit der Nutzung der Innovation verstanden werden [65]. Der dritte Faktor bezieht sich auf soziale Einflüsse bezüglich der Nutzung der innovativen Technologie, welche die Kundenakzeptanz und Adoption der neuen Technologie beeinflussen können. Viertens leisten unterstützende Faktoren wie Infrastruktur oder persönliche Beratung einen positiven Beitrag zur Akzeptanz innovativer Angebote. Einer der zentralen Erfolgsfaktoren für die Akzeptanz von Technologieinnovationen ist jedoch die Wahrnehmung der Verhaltenskontrolle. Schon bei interaktiven oder ferngesteuerten Dienstleistungen, deren Nutzung eine eingeschränkte und indirekte menschliche Interaktion impliziert, wurde der wahrgenommene Kontrollverlust als Faktor identifiziert, der negativ auf die Kundenakzeptanz wirkt [70], [71]. Diese Dienstleistungen zeichnen sich dadurch aus, dass der Kundenkontakt des Anbieters überwiegend oder sogar vollständig durch einen technologischen Mediator (beispielsweise ein Web-Interface) hergestellt wird. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass dem Vertrauen in technologiemediierte Dienstleistungen eine besondere Bedeutung zukommt, insbesondere dann, wenn die Nutzung der Dienstleistung als risikobehaftet wahrgenommen wird [69], [70]. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Forschung zur Akzeptanz von Technologieinnovationen und technologiemediierten Dienstleistungen die Bedeutung des wahrgenommenen Nutzens, Aufwands, sozialer Einflüsse und unterstützender Faktoren wie der wahrgenommenen Verhaltenskontrolle

bestätigt. Darüber hinaus ist das Vertrauen in die Leistung und den Anbieter eine notwendige Voraussetzung für die erfolgreiche Einführung innovativer Leistungen.

Im Gegensatz zur bereits gut etablierten Forschung zur Akzeptanz von Technologieinnovationen und technologiemedierten Dienstleistungen befindet sich die Forschung zur Kundenwahrnehmung von Dienstleistungsrobotern noch in einem frühen Stadium. Bestehende Studien befassen sich schwerpunktmäßig mit dem Einsatz von Robotern im Haushalt („Smart Home“, vgl. beispielsweise [31], [49]) und im Gesundheitsbereich [38]. Die bisherigen Forschungsergebnisse legen nahe, dass Menschen Roboter bevorzugen, die als vertrauenswürdige, beherrschbare und auf Interaktion und Kooperation fokussierte Unterstützer agieren, statt vollkommen eigenständig handelnde Roboter [23]. In gleicher Richtung weisen die Forschungsergebnisse zu Begleitrobotern darauf hin, dass die Nutzer diese primär als Assistenz- und Dienstmaschinen sehen werden und nur eine Minderheit der befragten Stichprobe sie als Gefährten oder gar als Freunde betrachten [18]. Die Forschungsarbeiten zu Begleitrobotern empfiehlt, dass die Rolle, das äußere Erscheinungsbild und das Verhalten des Roboters besser an die menschlichen Bedürfnisse angepasst werden sollten [9]. Diese Schlussfolgerungen lassen sich auf die Fragestellung übertragen, in welcher Beziehung automatisierte Fahrroboter zu ihrem menschlichen Gegenpart stehen sollten [54].

Ein weiterer zentraler Aspekt der Mensch-Maschine-Interaktion ist die wahrgenommene Autonomie der Konsumenten [4], [29]. Während die Rolle der Autonomie bereits in einigen Studien direkt oder indirekt angesprochen wurde, könnte ihre kritische Bedeutung für die Akzeptanz automatisierter Technologien in den untersuchten Fällen noch nicht vollständig erfasst sein. Die Beschränkung oder vollständige Aufhebung der Autonomie von Individuen könnte zu Reaktanz führen, einer negativen psychologischen und gegensätzlichen Verhaltensreaktion von Konsumenten als Reaktion auf eine empfundene Beschränkung ihrer individuellen (Entscheidungs-)Freiheit [6], [44]. Automatisierte Fahrsysteme könnten als Bedrohung der Autonomie des Fahrers wahrgenommen werden. Konsumentenseitige Reaktanz könnte sich dann in einer Verweigerung der Nutzung und niedrigen Einbauraten optional angebotener Systeme auswirken. Aus gegenwärtiger Sicht erscheint zumindest unklar, ob Konsumenten bereit sind, einen Kontrollverlust durch die Übergabe von Entscheidungskompetenz an eine Maschine zu tolerieren [56].

Im nächsten Abschnitt werden die bisherigen Ergebnisse von Studien über die konsumentenseitige Wahrnehmung des automatisierten Fahrens zusammengefasst.

32.2.2 Akzeptanzforschung zum automatisierten Fahren

Bislang existieren erst vergleichsweise wenige Studien zur Konsumentenwahrnehmung des automatisierten Fahrens. Da aufgrund des Neuigkeitsgrades der technologischen Entwicklung das Wissen der Konsumenten über das automatisierte Fahren begrenzt ist, analysiert eine aktuelle Studie die Leserkommentare zu 15 verschiedenen Zeitungsartikeln über das automatisierte Fahren in Deutschland und den USA [25]. Die Ergebnisse des Beitrags liefern Hinweise auf das implizierte Nutzenversprechen einer verbesserten Flexi-

bilität und eines erhöhten Komforts. Darüber hinaus zeigen sich kritische Kommentare, die sich auf die Sicherheit und Zuverlässigkeit der automatisierten Fahrtechnologie beziehen. Die Kommentare der US-Leser weisen in besonderem Maße negative Konnotationen bezogen auf die Beschränkung der individuellen Freiheit auf und deuten somit auf die hohe Relevanz des Autonomiebedürfnisses der Konsumenten hin.

Eine zweite Studie behandelt den Einsatz automatisierter Technologien in zwei verschiedenen Kontexten, und zwar der automatisierten Diagnose im Gesundheitsbereich und des automatisierten Fahrens. Der Beitrag liefert Anhaltspunkte dafür, dass der Marke des Anbieters eine bedeutende Rolle zur Reduktion des wahrgenommenen Risikos zukommen könnte [13]. In einer weiteren Studie werden vier verschiedene Szenarien zukünftiger Mobilität unter Mitwirkung von Experten von Fahrzeugherstellern, Behörden, Wissenschaft und Umweltschutzgruppen entwickelt [19]. Zwei der vier Szenarien beziehen sich auf das automatisierte Fahren und unterscheiden hierbei zwischen dem Besitz und dem dienstleistungs-basierten Zugang zu automatisierten Fahrzeugen. Beide Szenarien weisen eine schlechtere Beurteilung der Leistung aus Individualperspektive auf, während Vorteile auf der systemischen Ebene bestehen.

Eine erste Studie, die sich mit der Quantifizierung der Bedeutung psychologischer Treiber der Nutzungs- und Kaufabsicht beschäftigt, stellt basierend auf einer Stichprobe von 421 französischen Konsumenten positive Werte für die Verhaltensabsicht fest [51]. Es zeigen sich signifikant positive Einflüsse der generellen Einstellung gegenüber dem automatisierten Fahren, der Kundenakzeptanz und dem empfundenen Neuigkeitsgrad auf die Verhaltensabsicht. Darüber hinaus zeigt sich, dass männliche Befragte eine vergleichsweise höhere Nutzungsintention aufweisen. Diese Beobachtung steht im Einklang mit weiteren Forschungsarbeiten zur Adoptionsbereitschaft technologischer Innovationen, die üblicherweise eine höhere Bereitschaft zur frühzeitigen Adoption bei männlichen Konsumenten feststellt.

Der vorliegende Beitrag baut auf diesen Ergebnissen auf und konzeptualisiert ein Untersuchungsmodell, das die in diesem Abschnitt aufgeführten Schlüsselvariablen, die Rolle der Marke und die Bedeutung verschiedener Anwendungsfälle des automatisierten Fahrens umfasst. Im nächsten Abschnitt werden die Effekte der Markenstärke, der markenpolitischen Option einer Markenallianz und die Rolle der verschiedenen Anwendungsfälle zur Erklärung der Kaufbereitschaft hergeleitet.

32.3 Konzeptionelles Modell

32.3.1 Markenstärke und weitere Einflussfaktoren als Treiber der Kaufentscheidung

Aus akademischer und Praxissicht ist die Markenstärke, definiert als aus der Marke resultierender Zusatznutzen eines Produkts [20], ein wichtiger Wettbewerbsvorteil. Unternehmen können aus starken Marken Wettbewerbsvorteile ziehen, da diese die Möglichkeit zur Differenzierung bieten, mit einer höheren Kundenloyalität einhergehen und die Mög-

lichkeit zur Abschöpfung eines Preis-Premiums bieten [39]. Starke Marken unterscheiden sich messbar im konsumentenseitigen Markenwissen. Nach Keller [33] besteht das Markenwissen aus zwei Dimensionen: der Bewusstseinsgegenwärtigkeit einer Marke (*Brand Awareness*) und dem Markenimage. Die Bewusstseinsgegenwärtigkeit der Marke bezeichnet die Stärke der Verankerung einer Marke im Gedächtnis und die Wahrscheinlichkeit und Leichtigkeit, mit der die Marke unter verschiedenen Umständen erinnert oder wiedererkannt wird [59]. Das Markenimage ist definiert als die Wahrnehmung einer Marke in Form unterschiedlicher Assoziationen, die im Gedächtnis der Konsumenten mit dem Markennamen verbunden sind [33]. Die Vorteilhaftigkeit, Stärke und Einzigartigkeit dieser Assoziationen ermöglichen eine differenzierte Positionierung der Marke im Gedächtnis der Konsumenten, aus der die anbieterseitig intendierten positiven Konsequenzen resultieren können. Während starke Marken somit generell hilfreich für die Vermarktung von Produkten und Dienstleistungen sind, variiert deren Bedeutung jedoch branchenabhängig und ist für die Vermarktung von Automobilen typischerweise hoch [22]. Im Allgemeinen hängt die Bedeutung der Marke für die Kaufentscheidung stark von ihrem Beitrag als risikoreduzierender Faktor, ihrer Funktion zur Erhöhung der Informationseffizienz und ihrem symbolischen Wert ab. Da der Kauf eines Neuwagens den Charakter einer extensiven Konsumentenscheidung hat, mit relativ hohen Kosten und einer umfangreichen Informationsphase verbunden und das Auto immer noch ein wichtiges Statussymbol ist, kann von einem starken Einfluss der Marke auf das Kaufverhalten ausgegangen werden.

Ausgehend von der ersten empirischen Evidenz für die Risikoreduktionsfunktion starker Marken im Kontext des automatischen Fahrens [13] lässt sich auf Grundlage der genannten Markenfunktionen ein positiver Einfluss starker Marken auf die Akzeptanz automatisierter Fahrtechnologien schließen. Das Wissen über und die Erfahrung der Konsumenten mit automatisiertem Fahren ist gering. In Verbindung mit den zu erwartenden zusätzlichen Anschaffungskosten, um Fahrzeuge zum automatisierten Fahren zu befähigen, scheint es wahrscheinlich, dass Konsumenten die Kaufentscheidung als risikoreich einschätzen. Starke Marken können einen Beitrag dazu leisten, die Wahrnehmung dieses Kaufrisikos abzusenken.

Über die Unterscheidung zwischen starken und schwachen Marken von Automobilherstellern und Technologiekonzernen hinaus, die ein automatisiertes Fahrzeug einführen könnten, werden einige weitere Einflussfaktoren auf Basis der oben dargestellten Literaturquellen berücksichtigt. Genauer gesagt werden das funktionale Vertrauen, die wahrgenommene Vorteilhaftigkeit des Angebots, das empfundene Preis-/Leistungsverhältnis und der symbolische Nutzen eines automatisierten Fahrzeugs als relevante Treiber in ein konzeptionelles Modell zur Erklärung der Kaufbereitschaft integriert. Es wird weiter angenommen, dass diese Faktoren durch die Wahrnehmung der Sicherheit des Systems, der wahrgenommenen Autonomie, der Bedenken bezüglich des Schutzes der Privatsphäre [3] sowie die Markeneinstellung beeinflusst werden.

Zur Kontrolle von Einstellungsunterschieden zwischen Konsumenten, die unabhängig vom zugewiesenen Szenario bestehen, werden die generelle Affinität der Individuen, neue Produkte und Dienstleistungen frühzeitig zu adoptieren, ihre Autonomiepräferenz und die im Besitz befindliche Fahrzeugmarke berücksichtigt.

32.3.2 Zur Bedeutung von Markenallianzen im Kaufverhalten

Neben der naheliegenden Option der Einführung automatisierter Fahrfunktionen unter der Marke eines einzelnen Automobilherstellers oder eines Technologiekonzerns, sind Markenallianzen eine weitere erwägenswerte Option. Markenallianzen werden in einer Vielzahl von Branchen genutzt [40]. Eines der zentralen Ergebnisse der Forschung zu Markenallianzen ist, dass unbekannte oder unbeliebte Marken von einer Allianz mit einer bekannten und beliebten Marke profitieren können [53], [61]. Markenallianzen setzen sich dabei aus mindestens zwei Objekten zusammen, eine Unterscheidung erfolgt hierbei zwischen horizontalen und vertikalen Markenallianzen [1]. Vertikale Markenallianzen werden zwischen Akteuren auf nacheinander folgenden Stufen einer Wertschöpfungskette genutzt, so auch beispielsweise zwischen Intel als Lieferant von Prozessoren und Dell als Integrator von PCs. Im Unterschied hierzu gehören die Akteure horizontaler Markenallianzen einer Industrie- und Produktkategorie an (beispielweise Häagen-Dazs und Baileys). Im vorliegenden Kontext erscheint eine vertikale Markenallianz zwischen einem Automobilhersteller und einem Technologiekonzern ein realistisches Szenario zu sein, da bereits zahlreiche Allianzen zwischen diesen Akteuren über die Medien bekannt gegeben wurden [32], [37]. Teil der empirischen Analyse ist daher die Untersuchung von Unterschieden im Niveau der Kaufbereitschaft, die aus dem (nicht) Vorhandensein einer Markenallianz zwischen einer starken (schwachen) automobilen Herstellermarke und einer starken Technologiemarken resultieren.

32.3.3 Anwendungsfälle des automatisierten Fahrens und ihre Bedeutung für die Kaufbereitschaft

Die National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) unterscheidet fünf Stufen des automatisierten Fahrzeugs basierend auf der Verteilung der Kontrolle zwischen Fahrer und Fahrzeug [63]. Zur Analyse möglicher Unterschiede in der Kaufbereitschaft, die aus verschiedenen Anwendungsfällen resultieren könnten, werden verschiedene Anwendungsfälle auf den Stufen vier und fünf betrachtet. So werden die Befragten der ersten Studie mit einem Autobahnpiloten konfrontiert, bei dem der Fahrer jederzeit als übergeordnete Instanz den Fahrvorgang übernehmen kann. Die zweite empirische Studie erweitert Studie 1 durch die Untersuchung der Effekte hypothetischer Markenallianzen. In Studie 3 werden zwei weitere Anwendungsfälle eingeführt. Das automatisierte Valet-Parken ist mit einem geringeren persönlichen physischen Risiko und ebenso mit geringerem Autonomieverlust verbunden. Der dritte Anwendungsfall steht auf der fünften Stufe der NHTSA-Typologie und ist somit vollautomatisiert und ohne Option für den Fahrer, manuell den Fahrvorgang vom Automaten zu übernehmen. Es kann vermutet werden, dass dieser dritte Anwendungsfall von den Probanden besonders kritisch bewertet wird, da er ein hohes Maß an wahrgenommenem persönlichem physischem Risiko und eine starke Beschränkung der persönlichen Autonomie beinhaltet.

32.4 Beschreibung der Erhebung

Das entwickelte Modell wird zur empirischen Untersuchung in eine Serie von drei Studien unterteilt. Die Daten wurden mittels einer Online-Befragung unter Mitgliedern eines Online-Panel-Anbieters erhoben. Die Stichprobe wurde unter Berücksichtigung der folgenden Anforderungen gebildet: Die Befragten mussten im Besitz einer gültigen Fahrerlaubnis sein und ein Fahrzeug besitzen. Die Stichprobe wurde so gezogen, dass sie bezogen auf Alter und Geschlecht der Verteilung der deutschen Bevölkerung zwischen 18 und 70 Jahren entspricht.

Vor der Konfrontation mit der jeweiligen Manipulation wurden die Probanden gebeten, Marke und Modell des Fahrzeugs zu nennen, welches sie überwiegend nutzen. Darüber hinaus wurden sie gebeten, ihr Involvement mit Automobilen und die Vertrautheit und Einstellung gegenüber der/den Marke(n), die im Szenario genutzt wurde(n), einzuschätzen. Jeder Proband wurde daraufhin per Zufallsgenerator einem einzigen Szenario zugewiesen. Die Studien 1 und 2 basieren auf dem Autobahnpiloten als automatisiertem Fahrsystem. Studie 3 untersucht genauer, wie Konsumenten alternative Anwendungsfälle des automatisierten Fahrens bewerten (automatisiertes Valet-Parken, vollautomatisiertes Fahren ohne manuelle Fahrfunktion). Nach der Konfrontation der Probanden mit einem der Szenarien wurden sie gebeten, ihre Kaufbereitschaft für das optional angebotene automatisierte Fahrsystem anzugeben. Anschließend erfolgte eine Analyse zahlreicher Faktoren, deren Bewertung als positiv oder negativ mit der Erwägung eines Kaufs der angebotenen Lösung zusammenhängend postuliert wurde. Die Befragung endete mit Manipulationschecks, einer Selbsteinschätzung der eigenen Fahrfähigkeiten, des Stressempfindens, des subjektiven Sicherheitsgefühls im Straßenverkehr sowie der Abfrage von sozio-ökonomischen Charakteristika der Befragten. Die finale Stichprobe umfasst 545 Befragte. 55,2 Prozent der Befragten sind männlich, das Durchschnittsalter der Befragten ist 42,83 Jahre (Standardabweichung (Std.-Abw.) = 12,62).

32.5 Studie 1

32.5.1 Design der Studie, Datenerhebung und Operationalisierung der Konstrukte

Gegenstand der ersten Studie ist die laborexperimentelle Überprüfung des Einflusses, den die Markenstärke auf die Konsumentenakzeptanz eines automatisierten Fahrsystems besitzt. Hierzu wurden die Probanden gebeten, eine fiktive Pressemitteilung aufmerksam zu lesen, in der die Einführung eines Autobahnpiloten angekündigt wird, bei dem der Fahrer jedoch jederzeit in das Fahrgeschehen eingreifen kann. Zur Isolierung von potenziellen Effekten der unterschiedlichen Markenstärke der Anbieter (starke versus schwache Marken) und möglicher Unterschiede in der Vertrauenswürdigkeit der Akteure aufgrund unterschiedlicher Expertise (Automobilhersteller versus Technologiekonzerne) wurden ver-

| Nachrichten | Automobilbranche | Kurzmeldungen |

08. Juli 2014

09:45 MESZ

[Marke] demonstriert automatisiertes Fahren auf der Autobahn – Markteinführung ab Mitte 2015

Berlin (dpa). Wie **[Marke]** heute bekannt gab, wird im Zuge der jährlichen Fahrzeug-Updates **ab Mitte 2015** ein optionales Modul namens ADX (englisch für „Automated Driving Experience“) für alle Fahrzeugklassen der Marke **[Marke]** angeboten, mit dem **auf deutschen Autobahnen ein vollautomatisiertes Fahren** möglich wird.

Der Fahrer kann nach der Auffahrt auf die Autobahn das ADX-System mit einem einfachen Knopfdruck einschalten. Das ADX ist mit dem Navigationssystem verknüpft und übernimmt nach Aktivierung das zuvor in das Navigationssystem eingegebene Ziel der Reise. **Sämtliche Fahrfunktionen werden dann vom ADX bei einer manuell wählbaren Reisegeschwindigkeit von maximal 160 km/h übernommen.** „Der Fahrer wird somit zum Passagier und kann die Zeit zur Entspannung oder zum Arbeiten nutzen“, sagte PKW-Chef Herbert Müller. Trotzdem kann der Fahrer jederzeit in das Fahrgeschehen eingreifen und die Kontrolle über das Fahrzeug übernehmen. Vor der letzten Autobahnausfahrt vor dem Ziel wird der Fahrer durch ein Akustiksignal alarmiert, um rechtzeitig vor der Ausfahrt wieder die Kontrolle übernehmen zu können. Selbst an schlafende Autofahrer haben die Ingenieure von **[Marke]** gedacht. Falls nach zweifacher Aufforderung keine Übernahme der Fahraktivität durch den Autofahrer erfolgt, fährt das Fahrzeug an der Ausfahrt vorbei, steuert den nächsten Rastplatz an und parkt das Auto automatisch.

Das ADX wird **ab Juli 2015 in allen [Marke] -Modellen** für einen **Aufpreis von 3.500 €** erhältlich sein. „Mit der Einführung des automatisierten Fahrens auf der Autobahn leistet **[Marke]** einen wertvollen Beitrag zur Erhöhung der Sicherheit auf deutschen Straßen“, betonte der PKW-Manager.

Abb. 32.1 Fiktive Pressemeldung der ersten Studie

schiedene Pressemeldungen für die ausgewählten Akteure gestaltet. Das 2×2-Experiment umfasst somit vier verschiedene Szenarien, die sich nur durch die ausgewählte Marke unterscheiden, während alle weiteren Faktoren konstant gehalten werden. Abbildung 32.1 zeigt die in der ersten Studie eingesetzte Pressemeldung.

Insgesamt nahmen 239 Personen an der ersten Befragung teil. Die Befragten sind zwischen den Szenarien ungefähr gleichverteilt, die Zellen sind mit 49 bis 65 Befragten besetzt. Darüber hinaus bestehen keine Unterschiede im Alter und in der Geschlechtsverteilung der Befragten zwischen den Zellen. Zur Überprüfung, ob die Manipulationen der Markenstärke und der Branche von den Befragten unterschiedlich wahrgenommen wurden, wurde die Markeneinstellung als Manipulationscheck gemessen. Die Markeneinstellung drückt die Vorteilhaftigkeit und Stärke der Markenassoziationen aus, eine der beiden Dimensionen der Markenstärke. Da Automobilmarken meist eine sehr hohe Bewusstseinsgegenwärtigkeit (bezogen auf die Erinnerung wie auf die Wiedererkennung) aufweisen, wird in der Messung der Markeneinstellung eine trennschärfere Variable zur Messung von Unterschieden in der Markenstärke gesehen. Die Markeneinstellung wurde mit drei Fragen gemessen, welche die Vorteilhaftigkeit, Sympathie und Leistung der Marke erfassen. Im Ergebnis zeigen sich signifikante Unterschiede zwischen der starken (Mittelwert (MW) = 5,40; Std.-Abw. = 1,44) und der schwachen (MW = 4,55; Std.-Abw. = 1,55) Automarke (Irrtumswahrscheinlichkeit $p < 0,05$). Die Mittelwerte der starken (MW = 5,54; Std.-Abw. = 0,99) und der schwachen (MW = 3,75; Std.-Abw. = 1,79) Technologiemarken unterscheiden sich

ebenfalls signifikant ($p < 0,01$). Neben den Manipulationen wurde der Markenbesitz und Unterschiede in der Innovationsaffinität als Co-Variablen im Modell aufgenommen. Die Kaufintention als abhängige Variable wurde mit drei Fragen gemessen, welche die individuelle Wahrscheinlichkeit messen, ein Fahrzeug der jeweiligen Marke mit dem Autobahnpiloten zum angebotenen Preis von 3500 € zu kaufen bzw. den Kauf zu erwägen. Der Preis wurde in Analogie zu bestehenden Preisen für verschiedene Fahrassistenzsysteme festgelegt. Die Skala erfüllt die geforderten Anforderungen an die Reliabilität der Messung (Cronbachs $\alpha = 0,94$).

Zur Erforschung der Ursachen für die bestehende Varianz in der Kaufbereitschaft wurden die vermuteten Treiber und Barrieren auf der Wahrnehmungsebene abgefragt. Die Probanden wurden gebeten, das angebotene Wertversprechen des Systems (die Vorteilhaftigkeit) zu bewerten und darüber hinaus ihr funktionales Vertrauen, das Preis-/Leistungsverhältnis und das Prestige des automatisierten Fahrsystems einzuschätzen. Diese Mediatoren werden darüber hinaus von der Autonomiewahrnehmung, der Autonomiepräferenz, den Bedenken bezüglich des Schutzes der Privatsphäre, der Sicherheitsbewertung und der Markeneinstellung beeinflusst. Darüber hinaus wird im Modell für den Markenbesitz und für die Tatsache, ob sich die Probanden als frühe Käufer von Technologieinnovationen bezeichnen, kontrolliert. Die Ergebnisse der konfirmatorischen Faktorenanalyse zeigen ein valides und reliables Messmodell. Darüber hinaus wurde die Diskriminanzvalidität der im Modell enthaltenen Konstrukte untersucht [24]. Die durchschnittlich erklärte Varianz jedes Konstrukts übertrifft dabei die geteilte Varianz mit allen anderen Konstrukten. Daher kann auf eine ausreichende Reliabilität und Validität des Messmodells der Studie geschlossen werden. Die Ergebnisse des Messmodells und die Fragebatterien werden auf Nachfrage vom Verfasser zur Verfügung gestellt.

32.5.2 Ergebnisse

Die Kaufbereitschaft für den Autobahnpiloten mit Möglichkeit der manuellen Übernahme durch den Fahrer wird von den Befragten eher durchschnittlich bewertet ($MW = 3,30$; Std.-Abw. = 1,81), ein Ergebnis, welches im Einklang mit der generellen Skepsis gegenüber Neuproduktinnovationen steht. Von den 239 Befragten, die mit einem der vier Szenarien konfrontiert wurden, gaben 17,2 Prozent eine hohe oder sehr hohe Kaufbereitschaft für das automatisierte Fahrsystem an. Hingegen geben mehr als ein Drittel der Befragten (39,1 Prozent) der Stichprobe an, dass es (sehr) unwahrscheinlich ist, dass sie das System in näherer Zukunft kaufen würden. Die Ergebnisse zeigen, dass es bereits heute ein größeres Marktsegment gibt, das sich den Kauf eines automatisierten Fahrsystems vorstellen kann, jedoch auch noch Akzeptanzprobleme aufweist. Daher wird in einem nächsten Schritt untersucht, ob die Ergebnisse sich in Abhängigkeit von der Markenstärke des Anbieters und dem Industriesektor unterscheiden.

Zur Untersuchung des Einflusses der Markenstärke und des Industriesektors wurde eine Varianzanalyse durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen einen signifikanten Haupteffekt der

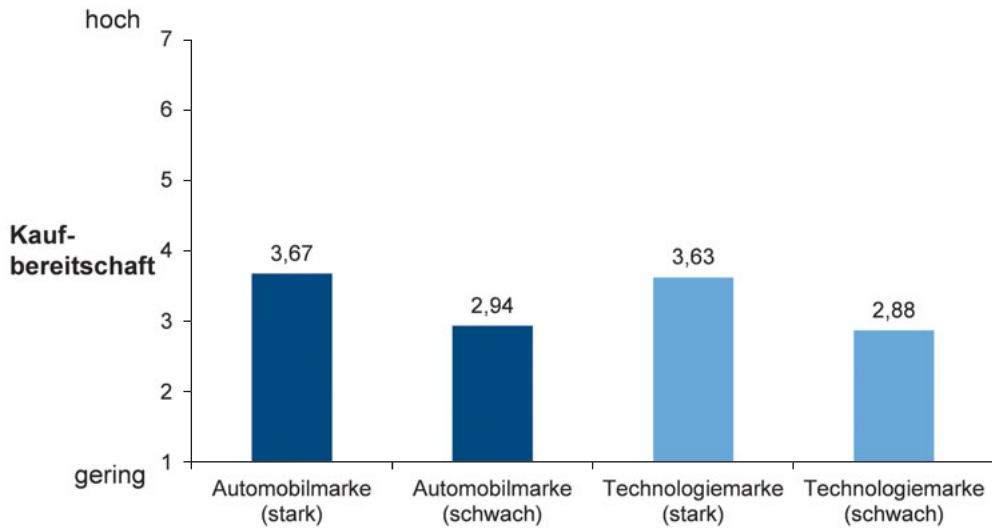


Abb. 32.2 Kaufbereitschaft für einen Autobahnpiloten in Abhängigkeit der Anbietermarke

Markenstärke ($p < 0,01$), und nicht-signifikante Effekte des Industriesektors des Unternehmens (Automobilhersteller versus Technologiekonzern) sowie des Interaktionsterms. Darüber hinaus erklären die Co-Variablen Innovationsaffinität und Besitz der abgefragten Fahrzeugmarke einen Teil der Varianz der Kaufbereitschaft. Die deskriptiven Ergebnisse der Untersuchung sind in Abb. 32.2 dargestellt.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Kaufbereitschaft von der Markenstärke positiv beeinflusst wird, jedoch unabhängig ist von der Branche des Unternehmens (Automobilhersteller oder Technologiekonzern). Die Mittelwerte für die starke Automobilmarke (MW = 3,67; Std.-Abw. = 1,91) und die starke Technologiemarkte (MW = 3,63; Std.-Abw. = 1,70) sind auf dem gleichen Niveau. Die Werte für die Kaufbereitschaft der vergleichsweise schwächeren Automobilmarke (MW = 3,01; Std.-Abw. = 1,81) und der schwächeren Technologiemarkte (MW = 2,88; Std.-Abw. = 1,82) unterscheiden sich ebenfalls nicht.

Zur Untersuchung der Richtung und relativen Effektstärke der Einflussgrößen auf die Kaufbereitschaft wurde ein Strukturgleichungsmodell geschätzt. Die Pfadkoeffizienten β stellen dabei die Stärke und Richtung des Einflusses der unabhängigen Variablen auf die abhängigen Variablen innerhalb einer theoretisch möglichen Bandbreite von -1 bis $+1$ dar. Die Ergebnisse zeigen, dass das funktionale Vertrauen der stärkste Treiber der Kaufbereitschaft ist ($\beta = 0,432$; $p < 0,01$), gefolgt von der wahrgenommenen Vorteilhaftigkeit des dargestellten Autobahnpiloten ($\beta = 0,237$, $p < 0,01$). Die anderen Mediatoren stehen ebenfalls in einem signifikant positiven Zusammenhang mit der Kaufbereitschaft, sind aber vergleichsweise unwichtiger (Preis-/Leistungsverhältnis $\beta = 0,124$, $p < 0,05$; symbolischer Wert $\beta = 0,117$, $p < 0,05$; Innovationsaffinität $\beta = 0,169$, $p < 0,01$). Die Autonomiepräferenz wirkt sich hingegen signifikant negativ auf die Kaufbereitschaft aus ($\beta = -0,138$, $p < 0,01$). Entgegen der Erwartungen hängen die Unterschiede in der Beurteilung der Bedenken hin-

sichtlich der Privatsphäre nicht signifikant mit der Kaufbereitschaft zusammen ($\beta = 0,012$, $p > 0,1$). Insgesamt werden durch das Modell 67,9 Prozent der Varianz der gemessenen Kaufbereitschaft erklärt.

Das funktionale Vertrauen wird signifikant positiv von der Sicherheitswahrnehmung ($\beta = 0,383$, $p < 0,01$), der wahrgenommenen Autonomie ($\beta = 0,327$, $p < 0,01$), der Innovationsaffinität ($\beta = 0,163$, $p < 0,01$) und der Markeneinstellung ($\beta = 0,130$, $p < 0,01$) beeinflusst. Insgesamt werden 71,8 Prozent der Varianz des funktionalen Vertrauens erklärt. Das Kernwertversprechen des Autobahnpiloten – die wahrgenommene Vorteilhaftigkeit – wird stark positiv von der wahrgenommenen Autonomie ($\beta = 0,598$, $p < 0,01$) und negativ von der Autonomiepräferenz ($\beta = -0,298$, $p < 0,01$) beeinflusst. Die Markeneinstellung wirkt sich positiv auf die Beurteilung der Vorteilhaftigkeit aus ($\beta = 0,238$, $p < 0,01$). Bei den übrigen postulierten Einflussfaktoren bestehen hingegen keine signifikanten Effekte. Die Faktoren erklären insgesamt 63,3 Prozent der Varianz in der wahrgenommenen Vorteilhaftigkeit. Gleichmaßen wird das Preis-/Leistungsverhältnis stark positiv von der Autonomiewahrnehmung ($\beta = 0,450$, $p < 0,01$) und negativ von der Autonomiepräferenz ($\beta = -0,122$, $p < 0,05$) beeinflusst. Darüber hinaus beurteilen innovationsaffine Konsumenten das Preis-/Leistungsverhältnis des Autobahnpiloten vorteilhafter ($\beta = 0,241$, $p < 0,01$). Die Markeneinstellung trägt darüber hinaus ebenfalls signifikant positiv zur Erklärung der Beurteilung des Preis-/Leistungsverhältnisses bei ($\beta = 0,131$, $p < 0,05$). Insgesamt werden 42,8 Prozent der Varianz des Preis-/Leistungsverhältnisses durch das Modell erklärt. Der symbolische Wert wird des Weiteren stark von den Unterschieden in der Beurteilung der Markeneinstellung beeinflusst ($\beta = 0,575$, $p < 0,01$) und zu 33,1 Prozent erklärt.

Die Ergebnisse der ersten Studie bieten somit bereits relevante Erkenntnisse hinsichtlich der relativen Bedeutung von Treibern und Barrieren der Kaufbereitschaft für einen optionalen Autobahnpiloten. Noch wichtiger als die wahrgenommene Vorteilhaftigkeit wird das funktionale Vertrauen vom Modell als der kritischste Faktor identifiziert, der die Kaufbereitschaft beeinflusst. Neben der Kommunikation des zentralen Nutzenversprechens (der Vorteilhaftigkeit) sollte das Marketing daher insbesondere auf die Wahrnehmung der Sicherheit und Autonomie achten, da diese Variablen indirekt mit der Zielvariable, der Kaufbereitschaft, zusammenhängen. Starke Marken können einen wichtigen Beitrag zur Vermarktung der automatisierten Fahrtechnologie leisten, da die Unterschiede in der Markeneinstellung im Modell einen positiven Zusammenhang mit dem symbolischen Wert, dem Preis-/Leistungsverhältnis, der Vorteilhaftigkeit und dem funktionalen Vertrauen aufweisen. Wie oben gezeigt, unterscheiden die Befragten hierbei nicht zwischen den Marken der Automobilhersteller und den Technologiemarken. Daher können starke Marken von Technologiekonzernen wie Apple oder Google die Wettbewerbsposition der etablierten Automobilhersteller gefährden, und zwar insbesondere derjenigen Hersteller, deren Marke vergleichsweise schwach ist. Vor diesem Hintergrund wird in der zweiten Studie untersucht, ob schwache (starke) Automobilmarken von einer Markenallianz mit einer starken Technologiemarken profitieren können.

32.6 Studie 2

32.6.1 Design der Studie, Datenerhebung und Operationalisierung der Konstrukte

Die zweite Studie untersucht, ob Kundenakzeptanz und Kaufbereitschaft durch das Zusammenspiel von Automobilhersteller und Technologiepartner in Form einer Markenallianz positiv beeinflusst werden. Die Ergebnisse der Markenallianz-Szenarien werden mit den Resultaten der Einzelmarkenstrategien aus der Studie 1 verglichen. Ebenso wie in Studie 1 wurden die Befragten mit jeweils einem der zwei zusätzlichen Szenarien konfrontiert und darum gebeten, eine fiktive Pressemitteilung zur Ankündigung der Einführung eines AutobahnpiLOTS mit Eingriffsmöglichkeit des Fahrers in das aktuelle Fahrgeschehen zu lesen. Die Pressemeldung wurde im Vergleich zur Variante der ersten Studie so modifiziert, dass ein zweiter Markenname in den Titel und beide Markennamen in den Text der Mitteilung integriert wurden. Das Modell wurde wiederum auf Basis von Daten aus einer Online-Befragung unter Mitgliedern eines Online-Panel-Anbieters getestet. Die Selektionskriterien für die Stichprobe waren hierbei identisch mit denen der ersten Studie, und das Erhebungsinstrument wies die identische Struktur auf.

Über die Teilnehmer der ersten Studie hinausgehend nahmen 92 zusätzliche Befragte an der Erhebung zur zweiten Studie teil. Die Probanden sind zwischen den beiden Zellen annähernd gleichverteilt mit Zellgrößen von 45 bzw. 47 Befragten. Zwischen den beiden Zellen konnten keine Unterschiede hinsichtlich der Alters- und Geschlechtsverteilung festgestellt werden. Die Ergebnisse des Manipulationschecks bezogen auf Unterschiede in der Markeneinstellung verdeutlichen, dass signifikante Unterschiede ($p < 0,01$) zwischen der starken (MW = 5,35; Std.-Abw. = 1,62) und der schwachen Automobilherstellermarke (MW = 4,74; Std.-Abw. = 1,49) bestehen. Darüber hinaus wird die im Markenallianz-Szenario eingesetzte Technologiemarkenname signifikant positiver bewertet als die schwache Automobilmarke, wohingegen kein signifikanter Unterschied zur starken Automobilmarke besteht (MW = 5,50; Std.-Abw. = 1,01). Die Kaufbereitschaft wurde analog zur ersten Studie mit drei Fragen gemessen, darüber hinaus wurden die gleichen Co-Variablen aufgenommen. Das Strukturgleichungsmodell wurde ebenfalls repliziert, um mögliche Erklärungsansätze für bestehende Unterschiede in der Kaufbereitschaft feststellen zu können. Das Messmodell wurde bezogen auf die Kriterien der Reliabilität und Validität überprüft und zeigt eine gute Erfüllung der erforderlichen Bedingungen.

32.6.2 Ergebnisse

Zur Überprüfung der vermuteten Effekte wurde zunächst eine Varianzanalyse durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen einen signifikanten Haupteffekt des Co-Branding ($p < 0,01$) und einen signifikanten Einfluss der Innovationsaffinität der befragten Konsumenten auf die Kaufbereitschaft. Entgegen der Erwartung ist der Einfluss des Co-Branding auf die Kauf-

bereitschaft negativ. Die abhängige Variable verschlechtert sich von 3,67 auf 2,67 (Std.-Abw. = 1,93) für die starke Automobilmарke und von 3,01 auf 2,78 (Std.-Abw. = 1,80) für die schwache Automobilmарke. Zumindest für die schwache Automobilmарke wäre es aus theoretischer Sicht naheliegend, dass aus der Verbindung mit einer relativ attraktiveren Technologiemarkе positive Effekte auf die Kaufbereitschaft resultieren. Zur Analyse möglicher Erklärungsansätze für dieses Ergebnis wurde ein Strukturgleichungsmodell geschätzt. Die Analyseergebnisse weisen zum Teil deutliche Abweichungen zu den in Studie 1 berichteten Resultaten auf. So ist die Bedeutung des funktionalen Vertrauens im Falle einer Markenallianz noch bedeutsamer zur Erklärung der Kaufbereitschaft ($\beta = 0,747$, $p < 0,01$), als dies ohnehin schon im Falle einer Einzelmarkenstrategie ist. Die Beurteilung des Preis-/Leistungsverhältnisses besitzt wie gehabt einen signifikant positiven Einfluss auf die Kaufbereitschaft auf ($\beta = 0,180$, $p < 0,01$), während für die übrigen Variablen keine signifikanten Effekte festgestellt werden können. Der Einfluss des Sicherheitsempfindens auf das funktionale Vertrauen ist darüber hinaus stärker als im Falle einer Einzelmarkenstrategie ($\beta = 0,550$, $p < 0,01$). Die Autonomiewahrnehmung weist ebenfalls einen signifikant positiven, aber etwas schwächeren Effekt auf das funktionale Vertrauen auf ($\beta = 0,208$, $p < 0,05$).

Die Ergebnisse legen nahe, dass die Bewertung des automatisierten Fahrsystems durch eine Markenallianz zwischen einem Automobilhersteller und einer Technologiemarkе nicht verbessert wird – und zwar unabhängig davon, ob die Technologiemarkе gleich oder besser im Vergleich zur Automobilmарke bewertet wird. Die Konsumenten bilden ihre Kaufbereitschaft in einem starken Maße basierend auf ihrer Einschätzung der Vertrauenswürdigkeit des Angebots aus. Diese wird im Wesentlichen von den Sicherheitsbedenken und der Autonomiewahrnehmung beeinflusst. Im Falle einer starken Automobilmарke werden die Sicherheitsbedenken bei einer Markenallianz mit einer Technologiemarkе sogar noch negativer bewertet (MW = 4,15, Std.-Abw. = 1,82; $p < 0,05$) als bei einer Einzelmarkenstrategie (MW = 4,94, Std.-Abw. = 1,65). Für die vergleichsweise schwache Automobilmарke konnte dieser Effekt nicht nachgewiesen werden. Insgesamt zeigen die Ergebnisse der zweiten Studie somit auf, dass Automobilhersteller und Technologiekonzerne wie Apple oder Google den besonderen Nutzen einer potenziellen Markenallianz stärker herausstellen müssen. Konsumenten sehen in einer solchen Partnerschaft ein höheres Risiko, somit spielt das funktionale Vertrauen für die Adoption von automatisierten Fahrsystemen eine entscheidende Rolle.

Zur Überprüfung der Generalisierbarkeit der Ergebnisse wird im folgenden Abschnitt die Studie unter Verwendung zweier alternativer Anwendungsfälle des automatisierten Fahrens repliziert.