

Sicherheitspotenzial automatisierter Fahrzeuge: 17

Erkenntnisse aus der Unfallforschung

Thomas Winkle

Inhaltsverzeichnis

17.1 Einleitung	352
17.1.1 Motivation	352
17.1.2 Kategorisierungen von Automatisierungsgraden der Fahrzeugführung	353
17.2 Unfalldatensammlungen zur Darstellung von Sicherheitspotenzialen	354
17.2.1 Amtliche Straßenverkehrsunfallstatistik in Deutschland	354
17.2.2 German In-Depth Accident Study (GIDAS)	355
17.2.3 Straßenverkehrsunfallstatistik in den USA	355
17.2.4 Verkehrsunfalldaten in Asien am Beispiel China und Indien	356
17.2.5 Internationale Sammlung von Verkehrsunfalldaten	356
17.2.6 Unfalldatensammlungen der Automobilhersteller	356
17.2.7 Unfalldaten des Gesamtverbands der Deutschen Versicherungswirtschaft	357
17.2.8 Unfalldatensammlungen von Verbraucherverbänden (ADAC)	358
17.3 Grundlagen zur Unfalldatenauswertung	358
17.3.1 Erhebungstiefe versus Fallzahlen	358
17.3.2 Aussagekraft von Wirkfeldern im Vergleich zu Effektivfeldern	359
17.3.3 Sicherheitspotenzial in Abhängigkeit von Automatisierungs- und Wirkungsgrad	359
17.4 Aussagekraft möglicher Prognosen auf der Basis von Unfalldaten	360
17.4.1 A-posteriori-Analysen von Unfalldaten zu „driver only“/„no automation“	361
17.4.2 A-priori-Prognosen zu assistiertem und teilautomatisiertem Fahren	362
17.4.3 Sicherheitspotenzial von hoch- und vollautomatisiertem Fahren	366

T. Winkle (✉)

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

17.5 Sicherheitspotenzial versus Risiken zunehmender Automatisierung	368
17.5.1 Menschliche und technische Fehler bei Vollautomatisierung	368
17.5.2 Sicherheitspotenzial – Leistungsfähigkeit von Mensch und Maschine	369
17.5.3 Sicherheitspotenzial vollautomatisierter Fahrzeuge bei unabwendbaren Ereignissen	372
17.6 Fazit und Ausblick	372
Literatur	374

17.1 Einleitung

Die fortschreitende Automatisierung von Fahrzeugen verspricht neue Möglichkeiten, die zukünftigen gesellschaftlichen Anforderungen an die Mobilität besser zu erfüllen. In Teilbereichen werden neue erweiterte Konzepte für die Interaktion mit Maschinen [1] entstehen. Voraussetzung dafür ist die technische Weiterentwicklung von Assistenzsystemen mit leistungsfähigeren Sensor- und Informationstechnologien, die eine kontinuierliche Automatisierung von Fahraufgaben in der Fahrzeugführung bis hin zu selbstfahrenden Fahrzeugen möglich machen [2].

17.1.1 Motivation

Im Sinne der fortschreitenden Automatisierung bieten Automobilhersteller bereits seit der Jahrtausendwende aktiv lenkende Assistenzsysteme (Active Lane Keeping Assistance Systems – LKAS) in Kombination mit einem Abstandsregeltempomaten für Serienfahrzeuge an. Die kombinierte Funktionalität stand beispielsweise am japanischen Markt für die Rechtslenkerfahrzeuge Nissan Cima (2001) und Honda Inspire (2003) zur Verfügung. Bei der Nutzung beider Assistenten war ein kurzzeitiges teilautomatisiertes Fahren (s. Abschnitt 17.1.2) bis zu 20 Sekunden unter Aufsicht des Fahrers möglich (Testfahrten des Verfassers im Jahr 2003). Seit 2008 verkaufen auch deutsche Hersteller, beginnend mit dem VW Passat CC, aktive Lenkassistenten optional in ausgewählten Modellen [3].

Die Chancen für mehr Verkehrssicherheit steigen durch eine zunehmende Automatisierung von Fahrzeugen. Eine weitere Marktdurchdringung bereits serienmäßiger sicherheits erhöhender Fahrerassistenzsysteme wird zu einer weiteren Reduktion von Verkehrsunfällen führen (S. 361, Abschnitt 17.4.1).

Nach Angaben des Statistischen Bundesamtes verunglückten im Jahr 2013 bei Verkehrsunfällen in Deutschland 3339 Menschen tödlich [4]. Somit verlieren allein im deutschen Straßenverkehr durchschnittlich neun Menschen pro Tag ihr Leben. Darunter sind Unfälle, die künftig durch automatisierte Fahrzeuge vermeidbar wären. Aus Unfalldaten kann ein Sicherheitspotenzial abgeleitet werden. Die in diesem Beitrag genannten Beispiele zeigen Möglichkeiten und Grenzen der Auswertung von Unfalldaten auf. Mit einem Sicher-

heitspotenzial ist hier die prognostizierte Verringerung von Unfallschäden gemeint. Voraussetzungen für die Bestimmung eines konkreten Potenzials sind Grundannahmen zur gesamten Verkehrssituation sowie zum Anteil automatisierter Fahrleistung mit entsprechenden Funktionsgrenzen.

Verkehrsunfallforschung betreiben weltweit unterschiedliche Organisationen. Sie umfasst die Teilbereiche Unfall-Erhebung/-Statistik, Unfall-Rekonstruktion und Unfall-Analyse [5]. Grundlage für die Unfallforschung in Deutschland bildet die von der Polizei in allen Bundesländern geleistete örtliche Unfalluntersuchung. Darüber hinaus betreiben u. a. die VUFO (Verkehrsunfallforschung) der TU Dresden GmbH, die Medizinische Hochschule Hannover, Fahrzeughersteller und Institutionen wie die deutsche Versicherungswirtschaft eine eigene Unfallforschung. Dabei werden Verkehrsunfälle vorrangig direkt vor Ort untersucht, nach bestimmten Merkmalen statistisch erfasst, ausgewertet und bei Bedarf für die Weiterentwicklung zukünftiger Fahrzeugautomatisierung genutzt. Die nachfolgende Ausarbeitung zeigt beispielhaft Möglichkeiten und Grenzen der Erkenntnisse und Prognosen aus Unfalldatensammlungen im Hinblick auf das Sicherheitspotenzial automatisierter Fahrzeuge.

Folgende Fragen werden anhand konkreter Beispiele aus der Unfallforschung erörtert:

- Welche Bedeutung haben Auswertungen und Erkenntnisse aus der Verkehrsunfallforschung für die Einführung automatisierter Fahrzeuge?
- Wie lässt sich das Sicherheitspotenzial durch automatisierte Fahrzeuge nachweisen?

17.1.2 Kategorisierungen von Automatisierungsgraden der Fahrzeugführung

Im Folgenden werden drei Kategorisierungen zur Strukturierung von Automatisierungsgraden (bezogen auf die Fahrzeugführung) vorgestellt, die zur beispielhaften Darstellung der Möglichkeiten und Grenzen von Unfalldatenanalysen dienen. Für die anschließenden Ausführungen ist die 2012 veröffentlichte Einteilung der BASt-Projektgruppe „Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung“ [6] ausreichend. Die verwendeten fünf Grade der Automatisierung beginnen bei der ursprünglich konventionellen Fahrzeugführung mit der Bezeichnung „driver only“ wobei der Fahrer permanent die Längs- und die Querführung ausführt. Weitere Einstufungen setzen sich mit der „Fahrerassistenz“ (assistiert) und der „Teilautomatisierung“ fort, wobei der Fahrer auch letztere noch vollumfänglich und kontinuierlich zu überwachen hat. Abschließend ermöglichen die Stufen „Hochautomatisierung“ und „Vollautomatisierung“ teilweise oder andauernd ein Ausbleiben der menschlichen Überwachung bei der Fahrzeugführung [6]. Nachfolgend hat die amerikanische Behörde NHTSA fünf gleiche Stufen definiert [7]. Darauf aufbauend nahm das International On-Road Automated Vehicle Standards Committee der Society of Automotive Engineers (SAE) im Report J 3016 eine weitere Unterscheidung mit sechs Ebenen vor. Mit dieser Unterteilung arbeiten heute vermehrt Forschungsgruppen. Sie dif-

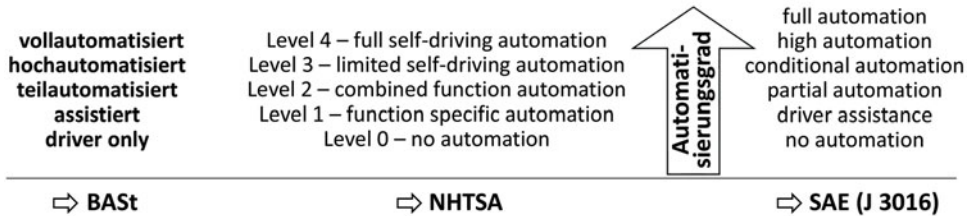


Abb. 17.1 Kategorien der Automatisierung nach BAST / NHTSA / SAE

ferenziert fahrerloses Fahren unter begrenzten Einsatzbedingungen sowie die Fähigkeit und Verantwortung einer vollständigen Übernahme von Fahraufgaben bei einer Vollautomatisierung [8], (s. Abb. 17.1).

17.2 Unfalldatensammlungen zur Darstellung von Sicherheitspotenzialen

Laut Unfallstatistik ereignet sich ein tödlicher Verkehrsunfall im Durchschnitt

- alle 2,7 Stunden in Deutschland,
- alle 25 Minuten (ca. 34.000 jährlich) in den USA und
- alle 26 Sekunden (mindestens 1.240.000 jährlich) weltweit [4, 9, 10].

Maßnahmen im Straßenbau, in der Gesetzgebung, der Rettungskette, der Notfallmedizin sowie der passiven und aktiven Sicherheit von Fahrzeugen haben die Verletzten- und Unfalldatensammlungen seit Anfang der 1970er-Jahre in den westlichen Ländern deutlich gesenkt. Grundlage für diese Erkenntnis bilden großräumige Erhebungen und Analysen von Verkehrsunfällen. Weltweit werden dafür Unfalldaten mit unterschiedlichen Ausrichtungen, Datenmengen und Erhebungstiefen gesammelt. Einige ausgewählte Unfalldatensammlungen, die Aussagen zum Sicherheitspotenzial automatisierter Fahrzeuge ermöglichen, werden im Folgenden mit entsprechenden Vor- und Nachteilen vorgestellt.

17.2.1 Amtliche Straßenverkehrsunfallstatistik in Deutschland

Auf Basis von §1 des Straßenverkehrsunfallstatistikgesetzes von 1990 veröffentlicht das Statistische Bundesamt in Wiesbaden monatlich eine Bundesstatistik über Getötete, Verletzte und Sachschäden. Alle Polizeidienststellen sind verpflichtet, aufgenommene Unfälle zu melden und begrenzte Informationen aus den Verkehrsunfallanzeigen über die statistischen Landesämter weiterzuleiten [4].

Regelmäßig werden diese bundesweiten Daten im Internet veröffentlicht. Die polizeilich festgestellte Unfallursache, die im Wesentlichen Fahrfehler der Fahrer bewertet, zeigt das

Potenzial für automatisiertes Fahren (S. 361, Abschnitt 17.4.1.1). Alle dokumentierten Informationen sind übersichtlich in Kategorien unterteilt, wie beispielsweise Straßenart, Alter der Beteiligten bzw. Unfallverursacher und Art der Verkehrsmittel. Nicht verfügbar sind spezifische Dokumentationen zu Unfallrekonstruktion, Verletzten und Fahrzeugdetails.

17.2.2 German In-Depth Accident Study (GIDAS)

Zur detaillierten und gleichzeitig statistisch abgesicherten Auswertung von Verkehrsunfallszenarien sind umfangreiche Daten notwendig. In Deutschland eignet sich hierfür die Datenbank der GIDAS (German In-Depth Accident Study). Sie gilt als eine der umfangreichsten und aussagekräftigsten Unfalldatenbanken der Welt und ist national wie international anerkannt [5, 11]. Die vertieften (In-Depth) Analysen am Unfallort erfolgen nach Auftreten eines Personenschadens fahrzeugübergreifend und werden in Deutschland seit 1973 von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) und seit 1999 auch von der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) unterstützt. Im GIDAS-Projekt werden in den Erhebungsgebieten Hannover (seit 1973) und Dresden (seit 1999) heute jährlich etwa 2000 Unfälle mit bis zu jeweils 3000 codierten Parametern anonymisiert in einer eigenen Unfalldatenbank abgelegt. Jeder dokumentierte Unfall enthält Angaben über die Umwelt (z. B. Wetter, Straßenart, Straßenzustand, Bebauung), die Situation (z. B. Verkehrslage, Konfliktsituation, Unfalltyp, Unfallart), die Fahrzeuge (Typ, Sicherheitsausstattung) sowie Personen- und Verletzungsdaten inklusive einer Unfallskizze mit Rekonstruktion und Bilddaten [5, 11, 12].

Die Vorteile der GIDAS-Daten gründen auf fahrzeugübergreifenden vertieften Analysen am Fahrzeug, an der Unfallstelle und im medizinischen Bereich. Viele Fälle sind für weitere Auswertungen detailliert elektronisch mit der Simulationssoftware PC-Crash der Firma DSD Datentechnik aus Österreich rekonstruiert und simuliert worden [13]. Ein Nachteil besteht darin, dass die Daten nur projektbeteiligten Automobilherstellern und Zulieferern zugänglich sind. Die Aufnahmekriterien schließen nur Unfälle mit Verletzten ein. Obwohl die Erhebung ausschließlich im Umkreis Hannover und Dresden erfolgt, lassen sich die Ergebnisse über eine Hochrechnung (in Fachkreisen: Wichtung bzw. Abgleich mit der amtlichen Unfallstatistik, s. Abschnitt 17.2.1) auf Gesamtdeutschland übertragen.

17.2.3 Straßenverkehrsunfallstatistik in den USA

In den USA dokumentiert die National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) über das Fatality Analysis Reporting System (FARS) seit 1975 jeden tödlichen Verkehrsunfall einheitlich [9]. Weiterhin existiert in den USA seit 1979 das National Automotive Sample System – Crashworthiness Data System (Nass-CDS) [14]. Ähnlich dem deutschen GIDAS-Projekt erheben interdisziplinäre Teams Verkehrsunfälle mit Personen- oder schweren Sachschäden.

Auch in den USA sind weitere Datensammlungen zur vertieften Unfallanalyse verfügbar, jedoch liefern sie im Vergleich zu GIDAS keine verlässliche Unfallrekonstruktion. Beispielsweise ist es nicht möglich, Notbremsfunktionen zu bewerten [11]. Die Unfallrisiken in den USA unterscheiden sich beispielsweise von den deutschen, aufgrund der längeren Fahrdistanzen. Der Rückgang der US-Verkehrsunfalltotenzahl seit 1970 fällt mit ca. 16 Prozent geringer aus als in Deutschland mit ca. 60 Prozent [4, 9].

17.2.4 Verkehrsunfalldaten in Asien am Beispiel China und Indien

Die Sammlung von Verkehrsunfalldaten in Asien befindet sich in den Anfängen. Die Analysen sind oberflächlich und enthalten keine verlässliche Rekonstruktion. Während in China erste Ansätze für verlässliche Datensammlungen bestehen, wird in Indien nicht einmal die Anzahl der Verkehrsunfalltoten erhoben [11].

17.2.5 Internationale Sammlung von Verkehrsunfalldaten

Die International Road Traffic and Accident Database (IRTAD) besteht aus einer Sammlung verschiedener nationaler amtlicher Unfallstatistiken. Sie beinhaltet Verkehrsunfälle mit Personenschäden allgemein sowie Getötete nach Alter, Ortslage und Verkehrsbeteiligung und wird von der Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) in Paris gepflegt. Neben den an Deutschland angrenzenden Ländern sind Unfalldaten enthalten von: Australien, Finnland, Griechenland, Großbritannien, Irland, Island, Israel, Italien, Japan, Kanada, Luxemburg, Neuseeland, Norwegen, Portugal, Schweden, Slowenien, Spanien, Südkorea, Ungarn und den USA [10].

Die Daten sind öffentlich im Internet zugänglich und eignen sich besonders für den Vergleich der enthaltenen Länderdaten. Es ist möglich, die Auswirkungen unterschiedlicher Regularien und des kollektiven Fahrverhaltens (beispielsweise Nord versus Süd) zu studieren. Jedoch fehlen vertiefende Informationen zum Unfallhergang. Außerdem unterscheiden sich Erhebungsmethoden und Datenmengen von Land zu Land.

17.2.6 Unfalldatensammlungen der Automobilhersteller

Um Erkenntnisse zum Unfallgeschehen aktueller Fahrzeuge zu sammeln und die Produktbeobachtungspflicht zu erfüllen, führen heute interdisziplinäre Expertenteams von Automobilherstellern und Zulieferern, gemeinsam mit Krankenhäusern und der Polizei, Unfallanalysen vor Ort durch. Mit diesen Ergebnissen lässt sich die Wirksamkeit aktuell eingeführter Fahrzeugsicherheitssysteme fortlaufend verbessern.

Außerdem dient die Analyse von Unfallereignissen durch den Hersteller der Einhaltung vorgeschriebener Pflichten und der Beobachtung möglicher Produktgefahren, die durch die

Nutzung entstehen können. Nach § 823 des Bürgerlichen Gesetzbuchs (BGB) haftet ein Automobilhersteller für Folgeschäden seiner Produkte, die im Rahmen des bestimmungsgemäßen oder vorhersehbaren Gebrauchs durch den Fahrer oder sonstige Personen durch einen Fehler auftreten. Deshalb muss ein Automobilhersteller Informationen über die Verwendung von Fahrzeugen und innovativen Systemen sammeln und analysieren. Je gefährlicher ein Produkt ist, desto höher sind die Schutzpflichten, das Produkt im Entwicklungsprozess abzusichern und darüber hinaus zu beobachten [15], (s. Kap. 21, 23, 28).

Unter den Automobilherstellern begann Mercedes-Benz bereits Ende der 1960er-Jahre, gemeinsam mit der Polizei im Landkreis Böblingen, Verkehrsunfälle unter Beteiligung von Mercedes-Fahrzeugen zu untersuchen. Zwei Jahre später konnte die Mercedes-Unfallforschung mit Erlaubnis des Ministeriums auf regelmäßige telefonische Informationen und Einsicht in die Unfallakten der Polizei in Baden-Württemberg zurückgreifen. Spätestens seit den 1970er-Jahren begannen auch andere Hersteller wie BMW im größeren Rahmen Kollisionen mit Beteiligung eigener Fahrzeuge zu untersuchen und zu speichern. Volkswagen begann Ende der 1960er-Jahre eine Zusammenarbeit mit dem Haftpflicht-, Unfall-, Kraftversicherer-Verband (HUK-Verband) und seit 1985 mit der Medizinischen Hochschule Hannover MHH (GIDAS-Vorläufer). Auch der Volkswagen-Konzern erhebt seit 1995 eigene Daten [11].

Interdisziplinäre vertiefte Unfallanalysen der Automobilhersteller unter Beteiligung neuer Fahrzeugtypen mit aktueller Sicherheitstechnik und insbesondere die Einbindung von Funktionsentwicklern ermöglichen nachvollziehbare Potenzialaussagen zu Fahrerassistenzsystemen. Allerdings ist die begrenzte Anzahl von ungefähr 100 Fällen pro Jahr, ausschließlich mit Beteiligung der eigenen Fahrzeugmarke, von ihrer statistischen Aussagekraft her nicht mit GIDAS-Daten vergleichbar.

17.2.7 Unfalldaten des Gesamtverbands der Deutschen Versicherungswirtschaft

Der Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (GDV), Nachfolgeorganisation des HUK-Verbandes, verfügt über dokumentierte Informationen des Schadensgeschehens aus Kraftfahrtschäden deutscher Versicherer, wenn auf Basis vertraglicher Zusagen Schadensersatz geleistet wurde. Diese Daten nutzt der GDV beispielsweise zur Einstufung von Versicherungsverträgen oder auch zur Ermittlung des Sicherheitspotenzials von Fahrerassistenzsystemen [16].

Die Unfallforschung der Versicherer hat Zugriff auf alle dem GDV gemeldeten Kraftfahrzeug-Haftpflicht-Schadensfälle. Leider sind die Daten nicht öffentlich zugänglich. Die Durchführung von Unfallanalysen erfolgt nicht direkt vor Ort, und die Unfallaufnahmekriterien sind nicht einheitlich. Außerdem endet das Interesse einer Versicherung an Einzelheiten eines Falles, wenn feststeht, dass sie zahlungspflichtig ist. Daher existieren bei unumstrittenen Fällen nur wenig detaillierte Daten zur Ursache. Bei Allein-Unfällen mit nur einem Beteiligten – wie beispielsweise bei sogenannten Fahrnfällen,

wenn der Fahrer die Kontrolle über das Fahrzeug verliert – sind meist keine Daten zur Ursache verfügbar [11].

17.2.8 Unfalldatensammlungen von Verbraucherverbänden (ADAC)

Die ADAC-Unfallforschung wird seit 2005 aufgebaut. Sie besteht aus einer Kooperation zwischen der ADAC-Luftrettung und dem ADAC-Technikzentrum. Aus den Rettungsflügen werden bislang jährlich bundesweit Informationen über ca. 2500 schwere Unfälle in der ADAC-Unfalldatenbank gesammelt. Die Unfalldaten stammen von Polizei, Ärzten, Feuerwehren und Kfz-Sachverständigen [17].

ADAC-Unfalldaten beinhalten Informationen zu Verkehrsunfällen mit Schwerverletzten. Darunter sind Luftbilder mit den Endlagen der Fahrzeuge und eine detaillierte medizinische Diagnostik. Auf Aktenbasis besteht die Möglichkeit für ergänzende Einzelauswertungen. Jedoch sind die Daten nicht öffentlich zugänglich. Es erfolgt keine abschließende interdisziplinäre Reflektion mit den jeweiligen unfallaufnehmenden Personen.

17.3 Grundlagen zur Unfalldatenauswertung

17.3.1 Erhebungstiefe versus Fallzahlen

Die Aussagekraft von Unfalldaten in Bezug auf Sicherheitspotenziale variiert deutlich, da die Daten unterschiedlich erhoben werden. Sogenannte *In-Depth*-Erhebungen werden meist in Zusammenarbeit mit qualifizierten interdisziplinären Teams durchgeführt. Besonders fundierte Ergebnisse sind durch gemeinsame Einzelfallanalysen von Funktionsentwicklern, Sachverständigen für Unfallanalyse, Medizinern und Verkehrspsychologen erreichbar. Bei einer derartigen Erhebungstiefe bestehen allerdings meist Einschränkungen aufgrund geringerer Fallzahlen, sodass die statistische Aussagekraft oft gering ist.

Auswertungen von Unfalldatenbanken erlauben Rückschlüsse auf Maßnahmen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit. Die detaillierte Unfallanalyse inklusive Unfallrekonstruktion umfasst sowohl die Rückrechnung von Geschwindigkeiten mithilfe der Unfallspuren als auch die Untersuchung der Unfallentstehung, Betrugsaufklärung sowie Betrachtungen zur Vermeidbarkeit und Biomechanik. Eine darauf basierende Potenzialbewertung zukünftiger Systeme setzt jedoch die umfangreiche Kenntnis vorgegebener Rahmenbedingungen voraus.

Bislang entstanden zukunftsweisende Ideen zur Erhöhung der Fahrzeugsicherheit vor allem durch die Kombination von Unfallanalysen, bestehenden Erfahrungen und umfassenden Forschungstätigkeiten. Unfallforschung ist eine Möglichkeit, die Effizienz bestehender und den Bedarf an neuen automatisierten Fahrzeugfunktionen zur Erhöhung der Sicherheit zu ermitteln. Im Weiteren werden Grundbegriffe zur Unfalldatenauswertung erklärt.

17.3.2 Aussagekraft von Wirkfeldern im Vergleich zu Effektivfeldern

Beim Vergleich verschiedener Unfalldatenanalysen ist die Art der Datengewinnung und die Art der Datenverarbeitung zu unterscheiden. Oft werden jedoch unter optimalen Bedingungen angenommene Wirkfelder mit Effektivfeldern unter realen Bedingungen vermischt.

Ein Wirkfeld (*area of action*) umfasst die Unfälle, auf die ein System Einfluss haben kann. Das Wirkfeld kann je nach Präzisierung der Spezifikation eines Systems unterschiedlich ausfallen. Im Ergebnis stellt es eine erste Abschätzung für ein maximal erreichbares Potenzial der betrachteten Automatisierungsstufe dar. Dagegen ist die tatsächlich resultierende Effizienz einer Funktion in der Regel deutlich geringer. Bei der Effizienz handelt es sich um die Wirkung, die ein spezifiziertes System tatsächlich hat. Sie wird entweder am Unfallgeschehen nachgewiesen (*a posteriori*) oder durch eine Simulation vorhergesagt (*a priori*).

Die Ermittlung eines Effektivfeldes (*area of efficiency*) erfordert somit eine genaue Kenntnis über:

- die Systemspezifikation mit entsprechenden Funktionsgrenzen und
- das Verhalten des Fahrers.

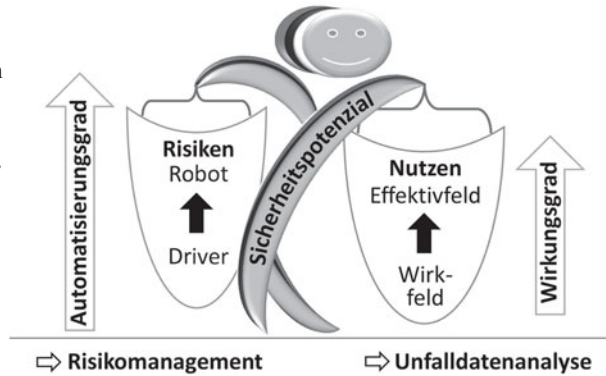
Der Wirkgrad (*degree of efficiency*) hingegen beschreibt den prozentualen Anteil, der die relative Effizienz einer Funktion zum Ausdruck bringt und immer von dem nicht eindeutigen Begriff des Wirkfelds abhängig ist [18]:

$$\text{Wirkgrad} = \frac{\text{Effektivfeld}}{\text{Wirkfeld}} = x [\%] \quad (17.1)$$

17.3.3 Sicherheitspotenzial in Abhängigkeit von Automatisierungs- und Wirkungsgrad

Einige Potenzialanalysen zum Sicherheitseinfluss auf der Basis von Unfalldatenbanken betrachten das oben beschriebene, maximal anzunehmende Wirkfeld. Dagegen kommen Wirkgradanalysen der Realität näher, denn sie schätzen ein Effektivfeld für den tatsächlichen Nutzen ein [18]. Der resultierende Sicherheitsnutzen automatisierter Fahrzeuge ergibt sich allerdings erst, nachdem alle Risiken berücksichtigt wurden. Der Nutzen entspricht der Verminderung der Unfallhäufigkeiten bzw. Unfallschwere. Neue Risiken bestehen im Hinblick auf bislang nicht existierende Unfälle, die mit einer zunehmenden Automatisierung entstehen können.

Abb. 17.2 Verbraucher bewerten das Sicherheitspotenzial subjektiv, indem sie wahrgenommene Risiken und den Nutzen kontextbezogen gegeneinander abwägen. Risiken hängen vom Automatisierungsgrad, der Nutzen vom Wirkungsgrad ab. Unfalldatenanalysen sowie Risikomanagement (s. Kap. 28) ermöglichen Objektivierung (s. Kap. 30) und Optimierung



Die *Theorie der erfinderischen Problemlösung* (TRIZ) definiert die Anforderungen einer idealen Maschine über die Formel für das *Ideale Endresultat* mit einem unbegrenzten Nutzen ohne Kosten und Schäden [19]:

$$\text{Ideales Endresultat} = \frac{\sum \text{Nutzen}}{(\sum \text{Kosten} + \sum \text{Schäden})} = \frac{\infty}{(0+0)} = \infty \quad (17.2)$$

Betrachtet man einerseits den tatsächlichen Gesamtnutzen im Hinblick auf das verbraucherrelevante Sicherheitspotenzial automatisierter Fahrzeuge, so steigt dieser entsprechend dem Wirkungsgrad bis zum maximalen „Effektivfeld“ an (Nachweis über Unfalldatenanalyse und Funktionskenntnis). Andererseits können die Risiken in Abhängigkeit vom Automatisierungsgrad („Driver“ versus „Robot“) ansteigen. Diese reduzieren wiederum den tatsächlichen Nutzen für die Sicherheit (s. Abb. 17.2). Zur Minimierung möglicher Risiken erfolgt vonseiten des Herstellers ein Risikomanagement (s. Kap. 28) unter Einbeziehung von Unfalldaten.

17.4 Aussagekraft möglicher Prognosen auf der Basis von Unfalldaten

Die nachfolgende Metaanalyse zeigt an Beispielen Möglichkeiten und Grenzen von Potenzialaussagen auf Basis verschiedener Unfalldaten. Da bislang keine Erfahrungen zur Analyse hoch- bzw. vollautomatisierter Fahrzeuge existieren, werden zunächst Fahrzeugsysteme ohne Automatisierung („driver only“/„no automation“) sowie mit geringeren Automatisierungsgraden bezüglich der Hauptfahraufgaben („assistiert“/„teilautomatisiert“) betrachtet, gegliedert nach A-posteriori- und A-priori-Analysen.

Abschnitt 17.4.1 beschreibt Beispiele für A-posteriori-Aussagen zu bislang erfassten Unfalldaten. In der hier genutzten Definition können „aus der Erfahrung gewonnene“ [20] Zahlen direkt für Interpretationen genutzt werden. Im Gegensatz dazu werden die in Ab-

schnitt 17.4.2 definierten A-priori-Prognosen auf der Basis von Unfalldatensammlungen für ein mögliches Potenzial zukünftiger Automatisierungsgrade ausschließlich mithilfe von Annahmen „durch logisches Schließen gewonnen“ [20].

17.4.1 A-posteriori-Analysen von Unfalldaten zu „driver only“/ „no automation“

A-posteriori-Analysen von Unfalldaten aus der Vergangenheit und Gegenwart mit konventionell vom Fahrer gesteuerten Fahrzeugen bilden die Grundlage für direkte Erkenntnisse zu Unfallschwerpunkten und Veränderungen im realen Unfallgeschehen. In der Kategorie „driver only“/„no automation“ erfolgen weder Warnungen noch Eingriffe in die Längs- oder Querverführung auf der Basis von Umgebungssensoren.

Zur Verdeutlichung dienen ein Beispiel zur Veränderung der Unfalldaten (s. Abschnitt 17.4.1.1) sowie ein weiteres zum Einfluss der Fahrdynamikregelung Electronic Stability Control – ESC (s. Abschnitt 17.4.1.2).

17.4.1.1 Verkehrsstatistik: Unfalltote versus zulassungspflichtige Fahrzeuge

Anhand der bisher gesammelten Unfalldaten des statistischen Bundesamtes lässt sich beispielsweise das Verhältnis der Verkehrsunfalltoten zu den zugelassenen Fahrzeugen darstellen. Es zeichnet sich in Deutschland – seit der dramatischen Anzahl von 21.332 Verkehrsunfalltoten im Jahr 1970 auf 3368 für das Jahr 2014 – eine fallende Tendenz ab [4].

Die Unfalldaten zeigen: Die Anzahl der Verkehrsunfalltoten ließ sich im Jahr 1970 mit über 21.000 auf jährlich annähernd 3000 – bei gleichzeitiger Zunahme zugelassener Fahrzeuge – senken. Die Ursachen dafür liegen im Bereich unterschiedlicher gesetzlicher, technischer, medizinischer und infrastruktureller Maßnahmen (s. Abb. 17.3). Die Überlagerung aller Sicherheitsvorkehrungen erschwert den Nachweis einzelner Potenziale.

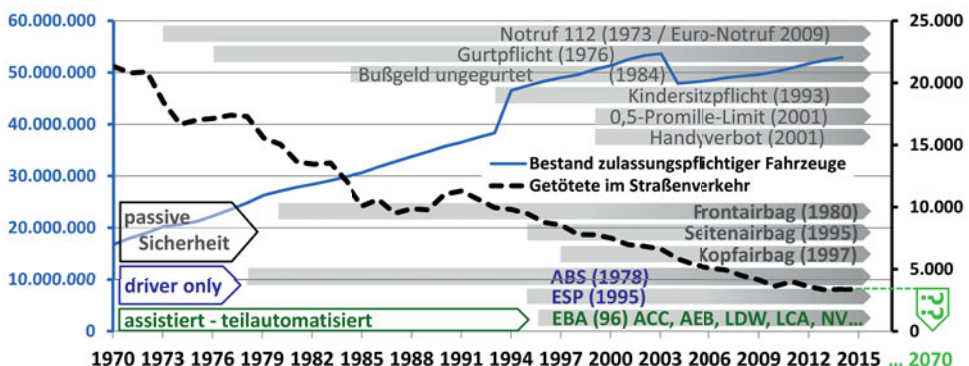


Abb. 17.3 Rückgang der Verkehrstoten durch sicherheitserhöhende Maßnahmen trotz Zunahme der Anzahl zugelassener Fahrzeuge in Deutschland

17.4.1.2 Studien zur Wirkung von „driver only“/„no automation“

Das seit 1995 eingeführte ESC-System baut technisch auf dem seit 1978 eingeführten ABS (Antiblockiersystem) auf. Es nutzt dessen Raddrehzahlsensoren mit zusätzlichen Sensoren für die Gierraten-, Lenkradwinkel und Querbeschleunigung. Die Informationen aus diesen Sensoren versuchen das Fahrzeug bei erkanntem Schleudern durch selbstständiges Anbremsen einzelner Räder zu stabilisieren. Durch diese Bremsengriffe kann ESC einen Seitenaufprall in einen weniger verletzungsgefährdenden Frontalaufprall umwandeln. Die Daimler-Unfallforschung ging 2001 davon aus, dass der Anteil von Schleuderunfällen mit verletzten Personen 21 Prozent und bei Unfällen mit tödlichem Ausgang 43 Prozent beträgt [21]. Auf diesen Erkenntnissen aufbauend erfolgten bereits einige Jahre nach der ESC-Einführung Einzelfallanalysen von Fahrdynamikunfällen. Die damaligen Ergebnisse aus Einzelfalluntersuchungen von Experten der Unfallforschungen seitens der Fahrzeughersteller klafften sehr weit auseinander. Auch spätere Potenzialaussagen auf der Basis größerer Datenmengen unterschieden sich. So weisen Wirkfelder aus dem Jahr 2000 einen positiven Einfluss bei schwerwiegenden Schleuderunfällen von bis zu 67 Prozent aus [22]. Andere Studien belegen: Das Elektronische Stabilitätsprogramm (ESC/ESP) in der Kategorie „driver only“ ist nach der Einführung des Sicherheitsgurtes die zweitwirksamste Sicherheitserhöhung für Fahrzeuge [2]. So verringerte sich der Anteil der Fahrunfälle bzw. Schleuderunfälle seit der serienmäßigen Einführung der Fahrdynamikregelung beispielsweise in allen Mercedes-Benz-Pkw im Zeitraum 2002/2003 von 20,7 Prozent auf 12 Prozent [22]. Die hohe Effektivität von ESC ließ sich auch bei anderen Marken, wie beispielsweise Volkswagen, über die Unfallstatistik durch eine geringere Unfallhäufigkeit und die Vermeidung besonders kritischer Unfalltypen nachweisen [23].

Fazit: Bei sicherheitserhöhenden „driver only“-Funktionen mit rascher Marktdurchdringung, wie es insbesondere bei ESC der Fall war, lässt sich bereits heute abhängig von unterschiedlichen Datenquellen und Annahmen ein Sicherheitsgewinn belegen. Insbesondere bei Fahrdynamikregelungen sind Sicherheitsauswirkungen wissenschaftlich fundiert belegbar.

17.4.2 A-priori-Prognosen zu assistiertem und teilautomatisiertem Fahren

A-priori-Prognosen sind an Hypothesen und Schlussfolgerungen geknüpft. So können assistierte und teilautomatisierte Funktionen den Fahrer durch optische, akustische oder haptische Hinweise bzw. kurze Eingriffe mit Warncharakter vor einer drohenden Gefahr bewahren. Voraussetzung für eine erfolgreiche Gefahrenabwehr ist jedoch die Annahme einer rechtzeitigen und der Verkehrssituation angepassten Reaktion des Fahrers.

Aus technischer Sicht ermöglicht diese fortgeschrittene Automatisierungsstufe – mit erweiterter Computer- und Sensortechnik zur Umfeldwahrnehmung – zunehmend leistungsfähigere Assistenzsysteme. Einige der heute angebotenen sicherheitserhöhenden Fahrerassistenzsysteme warnen bei erkannten Gefahren im Längs- oder Querverkehr. Dazu

zählen beispielsweise Kollisions- (EBA – Electronic Brake Assist, ACC mit FCWS – Adaptive Cruise Control mit Forward Collision Warning System), Fahrstreifenwechsel- (LCA – Lane Keep Assist), Fahrstreifenverlassens- (LDW – Lane Departure Warning), Nachtsicht- (NV – Night Vision) oder Kreuzungsassistent. Andere greifen in die Längs- oder Querdynamik ein, wie der elektronische Bremsassistent (EBA) oder eine automatische Notbremse (ANB/AEB Autonomous Emergency Brake) (s. Abb. 17.3).

17.4.2.1 Studie zum Potenzial von Lane Departure Warning

Eine Vorgehensweise, Verkehrsunfälle gemeinsam mit Ärzten, Psychologen und Entwicklungingenieuren zu analysieren, wurde 2006 am Beispiel eines Lane-Departure-Warning-Systems (LDW) vorgestellt [24]. Die unter Beteiligung des Verfassers, eines Psychologen und eines Funktionsentwicklers erzielten Ergebnisse beruhen auf einer interdisziplinären Forschungsgemeinschaft zwischen einem Automobilhersteller, einer Universitätsklinik und der Polizei mit Unterstützung durch das Bayerische Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr (BStMI).

Derartige interdisziplinäre Ursachen- bzw. Unfallfolgenanalysen umfassen die Betrachtung der technischen, medizinischen und psychologischen Details durch Fachleute des jeweiligen Gebiets mit anschließender gemeinsamer Integration aller Ergebnisse. So werden heute bei einer Verkehrsunfallanalyse vermehrt verkehrspsychologische Unfalldaten erhoben, die das Erleben vor einer Kollision aus der Sicht des Fahrers mithilfe standardisierter Interviews erfassen und bewerten. Der technisch rekonstruierte Unfallhergang wird durch die verkehrspsychologische Sichtweise ergänzt.

In Abstimmung zwischen den Fachteams wurde am Beispiel von Lane Departure Warning dargelegt, welche Voraussetzungen für die Auslegung in der Fahrzeugentwicklung zu treffen sind. Gezielte Fragestellungen aus der technischen Entwicklung filtern die gruppierten Unfälle. Damit lassen sich Aussagen über Unfallvermeidungspotenziale für in der Entwicklung befindliche Systeme treffen. Bedingung ist die Kenntnis der spezifischen technischen Systemgrenzen. Darüber hinaus sind Empfehlungen für weitere Systemerweiterungen möglich [24].

Fazit: Anhand dieser detaillierten Unfallanalysen zeigt sich der Nutzen einer umfassenden Unfalldatenerfassung. Für diese Studie waren Experten für Technik, Medizin und Psychologie eng vernetzt. Diese interdisziplinäre Vorgehensweise liefert zahlreiche zusätzliche Hinweise über Fahrzeugdetails, Unfallstelle, Unfallbeteiligte, Verletzungsmuster und Zeugenaussagen. Die Zusatzinformationen geben Aufschluss über Lenk- und Bremsingriffe sowie Reaktionen unmittelbar vor der Kollision, da bei einem Abkommen von der Fahrbahn menschliche Fehler wie Müdigkeit, Unaufmerksamkeit oder Ablenkung die Hauptursache darstellen. Verschiedene Blickwinkel eines interdisziplinären Teams ermöglichen eine realitätsnahe Rekonstruktion und computergestützte Simulation des Unfallgeschehens. Um daraus repräsentative Ergebnisse zu ermitteln, ist jedoch ein Abgleich mit größeren Unfalldatensammlungen notwendig.

17.4.2.2 Interdisziplinäre Wirkgradanalyse zu verfügbaren Fahrerassistenzsystemen

Aufbauend auf den Vorteilen interdisziplinärer Einzelfallbetrachtungen zur Wirkung von Lane Departure Warning im vorangehenden Abschnitt wurde vier Jahre später eine weitere interdisziplinäre Wirkgradanalyse durchgeführt, um das Potenzial bereits in Serie befindlicher sicherheitserhöhender Fahrerassistenzsysteme zu vergleichen. Diese Studie erfolgte anhand einer Stichprobe von rekonstruierten Unfällen ($n = 100$) in enger Absprache mit den jeweiligen Funktionsentwicklern. Die interdisziplinäre Unfalldatenauswertung in Bezug auf die Unfallursache und die situationsabhängige Wirksamkeit der Fahrerassistenzsysteme zur Vermeidung eines Unfalls führte ein Psychologe gemeinsam mit dem Verfasser durch [25]. Zur Untersuchung standen die seit Anfang 2010 angebotenen Seriensysteme Night Vision, Lane Departure Warning, Lane Change Assistant sowie Geschwindigkeitsmit Abstandsregelanlage (Adaptive Cruise Control). Für diesen Wirkgradnachweis erfolgte eine Auswertung von Unfallforschungsdaten, die anhand der Unfallstatistik für Bayern gewichtet wurde. Dabei wurden Realunfälle mit der rekonstruierten Unfallzene abgeglichen und in Bezug auf die Mensch-Maschine-Interaktion der Unfallursache bewertet. Dies erfolgte analog zu den im ADAS Code of Practice für die Entwicklung und sicheren Inverkehrbringung von künftigen Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) mit aktiver Längs- und Querführung beschriebenen Mensch-Maschine-Interaktionen [26]. Nach mehrjähriger Vorbereitung [27, 28] erfolgte 2009 die Veröffentlichung durch die ACEA [29]. Ausschließlich nach Zustimmung aller Entwicklungsexperten der jeweiligen Systeme kam es zu einer positiven Zuordnung eines Unfallvermeidungspotenzials. Ergebnis: Die untersuchten Systeme reduzierten die Unfallschwere deutlich.

Insgesamt konnte ein positiver Nutzen der untersuchten Fahrerassistenzsysteme durch die Vermeidung von Verkehrsunfällen mit einem Rückgang der Gesamtzahl der verletzten Personen um 27 Prozent prognostiziert werden. Dabei würde sich die Anzahl der Verletzten von ursprünglich 126 Fahrern mit 49 Beifahrern auf 94 Fahrer mit 33 Beifahrern reduzieren. Zu beachten ist, dass die Ergebnisse unter der Annahme optimaler Reaktionen hinsichtlich der Mensch-Maschine-Interaktionen stehen, die für eine Aussage zum Wirkgrad durch eine Probandenstudie zu verifizieren wäre. Weiterhin müsste eine 100-prozentige Verbreitung der Systeme gewährleistet sein, die innerhalb der Systemgrenzen fehlerfrei arbeiten.

Die vorgenommene Verletzungseinstufung erfolgte auf Basis der Abbreviated Injury Scale (AIS) [30], wie sie auch die ISO 26262 für die funktionale Sicherheit nutzt [31]. Diese AIS codiert jede Verletzung am menschlichen Körper mit einem Zahlenwert zwischen 1 (leicht verletzt) und 6 (nicht therapierbar). Dabei definiert sich die schwerste Verletzung aller Einzelverletzungen einer Person als MAIS (Maximum AIS). Eine unverletzte Person erhält die Einstufung MAIS 0.

Bei der weiteren Auswertung der Unfallursachen ergab sich ein Anteil der sogenannten Informationsfehler – also Störungen beim Informationszugang und der Informationsaufnahme – von über 60 Prozent. Daraus erklärt sich die entsprechend große Wirkung der warnenden Assistenzsysteme [25].

Fazit: Erstmals wurden in einer interdisziplinären Studie aktuell erhältliche Fahrerassistenzsysteme unter Einbeziehung der jeweils beteiligten Entwickler verglichen. Jeder einzelne Entwickler kennt die spezifisch relevanten Funktionsparameter seines Systems und ermöglicht somit treffsichere Potenzialbewertungen. Allerdings ist anzumerken, dass die gewichtete Stichprobe mit 100 Fällen in der Wirkfeldstudie im Vergleich mit den repräsentativen Unfalldaten aus Bayern zu klein ist, um anhand der gewonnenen Ergebnisse eine statistisch belastbare Aussage zu treffen. Dennoch lässt sich aus den Ergebnissen die Tendenz ableiten, dass diese Fahrerassistenzsysteme erheblich zur Verkehrssicherheit beitragen.

Es sei darauf hingewiesen, dass weitere Möglichkeiten zur Erlangung statistischer Aussagen für die Wirkung von Bremsassistenten und die automatische Notbremsfunktion bestehen. Dazu existieren Bewertungsmethoden zur Prognose des Sicherheitsgewinns, die auf Simulationen elektronischer Unfallrekonstruktionen basieren [32].

17.4.2.3 GIDAS-Datenbankanalyse zum Sicherheitspotenzial vernetzter Fahrzeuge

Die folgende GIDAS-Datenbankanalyse (German In-Depth Accident Study) zeigt die Komplexität und Vielfalt verschiedener Annahmen anhand einer größeren Datenmenge. Diese Analyse mit einer aussagefähigeren Stichprobe führte der Verfasser im Jahr 2009 zusammen mit einem Expertenteam im Rahmen des Forschungsprojekts „Sichere Intelligente Mobilität – Testfeld Deutschland“ (simTD) durch. Ziel war es, die Effizienz zukünftiger sicherheitsrelevanter Fahrzeugkommunikationssysteme abzuschätzen. Betrachtet wurden Funktionen für vernetzte Systeme mit direktem Sicherheitseinfluss auf den Straßenverkehr. Als Datengrundlage dienten 13.821 von GIDAS dokumentierte Unfälle mit Personenschaden der Jahre 2001 bis 2008 aus den Großräumen Dresden und Hannover [12]. Für die Hochrechnung auf Gesamtdeutschland wurden die nach einem statistischen Stichprobenplan erhaltenen Daten anhand der amtlichen Unfallstatistik des Statistischen Bundesamtes gewichtet. Die amtliche Statistik enthält alle in Deutschland registrierten Unfälle mit Personenschaden während eines Kalenderjahres. So kam es etwa im Jahr 2007 zu 335.845 Verkehrsunfällen mit Personenschaden [4].

Die zur Auswertung notwendigen Variablen wurden in mehreren Absprachen mit den simTD-Funktionsentwicklern und Unfallexperten der Firmen Audi, BMW, Volkswagen, Daimler und Bosch genau definiert. Die Projektteilnehmer einigten sich im ersten Schritt auf die Betrachtung von 13 sicherheitsrelevanten Warnfunktionen. Im Rahmen mehrerer Workshops entschieden die Projektteilnehmer einstimmig, für diese Betrachtung die relevanten Fahrzeuge wie beispielsweise Pkw, Lkw, Busse, landwirtschaftliche Zugmaschinen, Schienenfahrzeuge (mit Straßenbahnen und Stadtbahnen, jedoch keine Fahrzeuge der Deutschen Bahn) und Motorräder (motorisiertes Zweirad, Trike, Quad ab 125 cm) zu berücksichtigen. Anschließend wurden sehr aufwendige Wirkfeldbestimmungen auf Basis der umfangreichen GIDAS-Daten durchgeführt. Zunächst erfolgte die Selektion anhand der Unfallvariablen aller für das jeweilige System relevanten Unfälle in Bezug auf das gesamte Unfallgeschehen. Im Ergebnis bewegten sich die Anteile der Wirkfelder aus den einzeln untersuchten Funktionen innerhalb einer großen Bandbreite zwischen 0,2 Prozent

und 24,9 Prozent. Dabei gibt das Wirkfeld lediglich eine Abschätzung der maximalen Effizienz an, die mit sehr großer Sicherheit nicht überschritten wird. Zu beachten ist darüber hinaus, dass einzelne Wirkfelder nicht aufsummiert werden dürfen, da zwischen den Funktionen Wirkfeldüberschneidungen auftreten.

In einer darauf folgenden Wirkgradanalyse wurden aus der oben beschriebenen GIDAS-Wirkfeldanalyse drei Funktionsausprägungen (elektronisches Bremslicht, Querverkehrsassistent, Verkehrszeichenassistent für Stoppschilder) ausgewählt und über eine Simulation reduzierter Stichproben aus Fahr Simulatoruntersuchungen entsprechende Wirkgrade angenommen. Für die durch den Fahrer vermiedenen Unfälle bei einem Querverkehrsassistenten (vgl. [33]) ergab sich beispielsweise eine erhebliche Bandbreite von 9,9 bis 73,3 Prozent. Diese resultiert aus den unterschiedlichen Reaktionszeiten der Fahrer und aus den Bremsintensitäten nach Warnungen. Deshalb wurden drei Reaktionszeiten (0,54/0,72/1,06 Sekunden) und die jeweilige Auftretenswahrscheinlichkeit (36/48/16 Prozent) festgelegt. Angenommen wurde bei erfolgloser Reaktion eine schwache Bremsung mit 50 Prozent und bei erfolgreicher Reaktion mit 100 Prozent des maximalen Bremsdrucks [12].

Fazit: Die aufwendige Vorgehensweise dieser Wirkgradanalyse hatte das Ziel, Potenziale zukünftiger vernetzter sicherheitserhöhender Fahrerassistenzfunktionen mit statistischer Relevanz zu ermitteln und zu bewerten. Die ermittelte Bandbreite von bis zu ca. 70 Prozent schmälert jedoch die Aussagekraft und lässt damit lediglich Tendenzen und Aussichten in Bezug auf vermiedene Unfälle zu. Diese starke Streuung liegt in der Sensitivität der oben beschriebenen Parameter und des bewerteten Warn-Algorithmus begründet, denn die Reaktionszeiten und die Bremsintensitäten der Fahrer auf Warnungen weichen in der Praxis stark voneinander ab.

17.4.3 Sicherheitspotenzial von hoch- und vollautomatisiertem Fahren

Aus technischer Sicht können heute automatisierte Fahrzeuge viele Fahraufgaben im Verkehrsgeschehen unter günstigen Bedingungen selbstständig übernehmen. Während Assistenzsysteme den Fahrer unterstützen, übernimmt komplexe Technik beim hoch- bzw. vollautomatisierten Fahren die Fahraufgaben teilweise oder permanent.

Hoch- und vor allem vollautomatisiertes Fahren soll einer „Vision Zero“ näherkommen: Ziel ist es, möglichst unfallfrei mobil zu sein. Straßen und Verkehrsmittel sollen so sicher gestaltet sein, dass keine Menschen getötet oder schwer verletzt werden. Die Vision der Unfallfreiheit hat ihren Ursprung im Arbeitsschutz und wurde in den 1990er-Jahren in Schweden erstmals auf den Straßenverkehr angewendet. Die EU unterstützte Projekte für selbstfahrende Fahrzeuge wie das Forschungsprojekt „Highly automated vehicles for intelligent transport“ (HAVEit), das von der EU mit 17 Millionen Euro gefördert wurde. Auch Automobilhersteller wie Audi, BMW, Daimler und Volkswagen arbeiten an Visionen zum unfallfreien Fahren. In einem Interview erklärt Thomas Weber, Vorstandsmitglied für Forschung und Entwicklung der Daimler AG:

Unser Weg zum unfallfreien Fahren treibt uns an, die Mobilität auch in Zukunft für alle Verkehrsteilnehmer so sicher wie möglich zu gestalten. [21]

Die Anzahl der Verkehrsunfälle mit Personenschaden und einem Pkw als Hauptverursacher ist im ersten Jahrzehnt dieses Jahrhunderts in Deutschland von 266.885 im Jahr 2001 auf 198.175 im Jahr 2010 zurückgegangen. Laut Statistischem Bundesamt (2010) sind Pkw mit einem Anteil von 68,7 Prozent Hauptverursacher von Verkehrsunfällen. Dabei verteilen sich die Unfalltypen im Schwerpunkt auf die Kategorien Einbiegen/Kreuzen (58.725), Längsverkehr (44.812), Abbiegen (33.649) und 30.737 Fahrurfälle [4] (s. Abb. 17.4).

Bislang fehlt es noch an empirischen Belegen für den übergreifenden Sicherheitsgewinn von Fahrzeugen mit höheren Automatisierungsgraden. Eines der ersten umfangreicheren Prognosemodelle der Fahrzeugsicherheits- und Unfallforschung hat Daimler veröffentlicht. Ermittelt wurde dabei das Unfallvermeidungspotenzial automatisierter Fahrzeuge mittels angenommener Einführungs- und Marktdurchdringungsszenarien durch Expertenabschätzungen und Prognosen Dritter zusammen mit GIDAS-Daten. Die Prognose, die eine erste grobe Abschätzung liefern kann, basiert auf einer Vermeidbarkeit von insgesamt 198.175 durch Pkw verursachten Kollisionen im Jahr 2010 (s. Abb. 17.4). Die Annahmen berücksichtigen Veränderungen innerhalb der jeweiligen Unfalltypen (Längsverkehr, ruhender Verkehr, Fußgänger, Einbiegen/Kreuzen, Abbiegen, Fahrurfälle). So zeigt sich, dass Fahrurfälle und Unfälle im Längsverkehr bis zum Jahr 2060 durch eine zunehmende Automatisierung um ca. 15 Prozent abnehmen, während Einbiege- und Kreuzungsunfälle mit ca. 10 Prozent anteilig ansteigen [34].

Auf Grundlage dieser Abschätzungen einer zunehmenden Automatisierung wäre eine Unfallreduktion um 10 Prozent bis 2020 erreichbar. In den weiteren Jahren ist eine Reduktion um 19 Prozent bis 2030, um 23 Prozent bis 2040, um 50 Prozent bis 2050, um 71 Prozent bis 2060 und eine annähernd vollständige Vermeidung für das Jahr 2070 erreichbar [34]. Nach dieser Prognose verursacht ein Pkw im Jahr 2070 nahezu keine Unfälle, jedoch kann er schwere Kollisionen erleiden. Anzunehmen ist, dass ein automatisiertes Fahrzeug die eine oder andere Kollision vermeiden kann, die ein Dritter verursacht. Allerdings bleibt bei dieser Betrachtung eine Unfallverursachung durch andere Verkehrsteilnehmer unberücksichtigt. Mögliche technische Fehler (s. Abb. 17.5) bleiben ebenfalls unbeachtet.

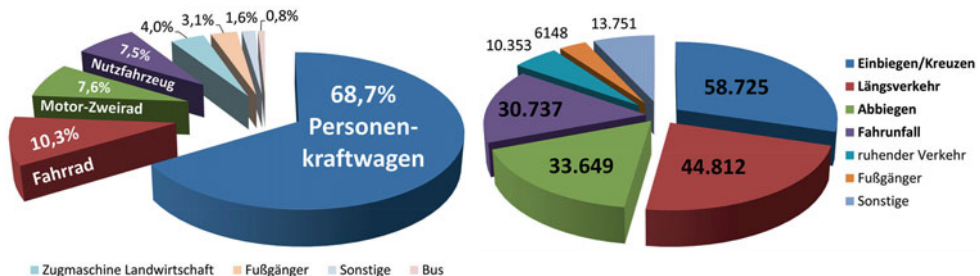


Abb. 17.4 Pkw als Hauptunfallverursacher und Unfalltypen, Quelle: DESTATIS, GIDAS

Hinzu kommt, dass die verwendeten Daten des statistischen Bundesamtes, und vor allem die Aussagekraft aus GIDAS, hauptsächlich auf Crash- und Post-Crash-Aussagen zu Kollisionen mit Verletzten fokussieren (vgl. [35]). Für eine ganzheitliche Evaluierung relevanter Verkehrsszenarien und Unfallschwerpunkte zur aktiven Sicherheit regelkonform fahrender hoch- sowie vollautomatisierter Fahrzeuge empfiehlt der Autor darüber hinaus die Einbeziehung weltweit erhobener Verkehrsunfalldaten – einschließlich der Kollisionen ohne Personenschaden, Beinahekollisionen, Verkehrssimulationen und Wetterdaten. Diese könnten noch mit Informationen von Krankenhäusern und Versicherungen ergänzt werden. Dafür ist eine Verknüpfung gemeinsamer Kriterien aller bekannten Kollisionen mittels international geografisch definierter Verkehrsunfall-, Wetterdaten und zugehöriger Verkehrsflussdaten anzustreben. Beispielsweise liegen für die Bundesstaaten der USA über www.saferoadmaps.org ortsgebundene Unfallinformationen vor. Ähnlich veröffentlicht die britische Regierung Einzelheiten anhand von www.data.gov.uk, die wiederum über eine UK Road Accident Map verortet sind. Regionale Unfalldaten in Deutschland können aus polizeilichen IT-Anwendungen – in einigen Bundesländern aus dem Geografischen Lage-, Analyse-, Darstellungs- und Informationssystem (GLADIS), dem Verkehrs-Unfall-Lage-Karten und Analyse-Netzwerk (VULKAN), dem Brandenburgischen Expertensystem für die Analyse und Dokumentation von unfallauffälligen Streckenabschnitten (BASTa), dem Geografischen Polizeilichen Informationssystem für Verkehrsunfälle (GEOPOLIS V) oder der weit verbreiteten Elektronischen Unfalltypensteckkarte (EUSka) [36] – entnommen werden.

Fazit: Für hoch- und vollautomatisiertes Fahren existieren weder verbindliche Funktionsbeschreibungen einer marktreifen Serienlösung noch Aussagen über konkrete Funktionsgrenzen, weshalb für Prognosen zum Sicherheitspotenzial bis dato zahlreiche Annahmen zu treffen sind. Noch fehlen verbindliche Aussagen über Markteinführungen und -verbreitung. So bieten heutige Ansätze zum Sicherheitspotenzial auf der Basis von Unfalldaten lediglich eine beschränkte Aussagekraft. Daher empfiehlt sich die Zusammenführung vertiefter Unfalldatensammlungen (beispielsweise GIDAS) mit allen weltweit verfügbaren Verkehrsunfalldaten, Verkehrssimulationen und den zugehörigen Wetterinformationen.

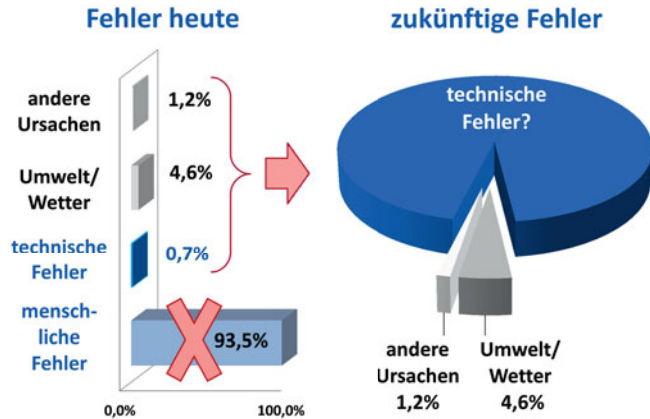
17.5 Sicherheitspotenzial versus Risiken zunehmender Automatisierung

17.5.1 Menschliche und technische Fehler bei Vollautomatisierung

Ausgehend davon, dass die meisten Unfälle durch menschliche Fehler verursacht werden, wäre mit fehlerfreien vollautomatisierten Fahrzeugen die Realisierung der „Vision Zero“ annähernd möglich. Allerdings ist auch bei vollautomatischem Fahren mit technischen Fehlern selbstfahrender Fahrzeuge zu rechnen.

Die linke Seite der Abb. 17.5 zeigt die statistische Unfallursachenverteilung auf Basis der GIDAS-Unfalldatenbank. Auf der Grundlage von Unfalldaten ist das menschliche Fehlverhalten mit einem Anteil von 93,5 Prozent das Hauptrisiko für Verkehrsunfälle.

Abb.17.5 Heute resultieren Unfälle zu 93,5 Prozent aufgrund menschlicher Fehler. Bei Vollautomatisierung gäbe es keine menschlichen Fehler mehr. Allerdings könnte der Anteil technischer Fehler zukünftig deutlich vergrößert wahrgenommen werden.



Dagegen fallen Einflüsse durch die Fahrumgebung – beispielsweise Fahrbahnbeschaffenheit oder Witterung – mit 4,6 Prozent sowie Mängel am Fahrzeug mit 0,7 Prozent laut Statistik relativ gering aus [37].

Bei Vollautomatisierung entfallen die durch menschliche Fahrfehler verursachten Unfälle. Die Kategorie „technische Fehler“ wird durch neue Risiken des vollautomatischen Fahrens anteilig vergrößert und in der Wahrnehmung der Gesellschaft erhöhte Aufmerksamkeit finden (s. Abb. 17.5).

17.5.2 Sicherheitspotenzial – Leistungsfähigkeit von Mensch und Maschine

Die Verkehrssicherheit von Fahrzeugen hängt heute im Wesentlichen von der Leistungsfähigkeit des Menschen mit Unterstützung sicherheitserhöhender Systeme ab. Vollautomatisierte Fahrzeuge werden nur von der maschinellen Leistungsfähigkeit abhängig sein. Je nach Automatisierungsgrad ersetzen technische Systeme Wahrnehmungen, Erfahrungen sowie das Urteils- und Reaktionsvermögen des Menschen. Aus den unterschiedlichen Stärken und Schwächen von Mensch und Maschine ergeben sich das Sicherheitspotenzial und die Risiken einer zunehmenden Automatisierung bei der Fahrzeugführung.

So können Maschinen beispielsweise nicht auf unbekannte Situationen reagieren oder Bewegungen von Kindern interpretieren (s. Kap. 20). Der Mensch hingegen kann un aufmerksam sein, schlecht Abstände oder Geschwindigkeiten einschätzen und nur in einem begrenzten Sichtfeld wahrnehmen [29].

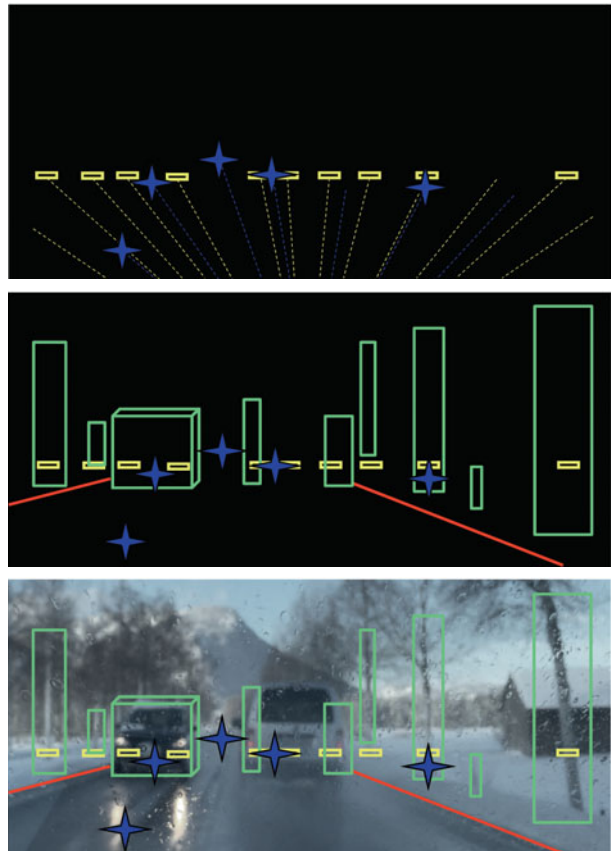
17.5.2.1 Maschinelle versus menschliche Wahrnehmung im Verkehrsgeschehen

Zur Veranschaulichung der eingeschränkten Leistungsfähigkeit technischer Wahrnehmung im Vergleich zur menschlichen wird im Folgenden ein stark vereinfachtes und unvollständiges Modell derzeit am Markt genutzter Sensortechnologien verwendet. Damit ein Fahr-

zeug Informationen über die Umgebung erhält, sind Sensoren notwendig, die nach ihrem physikalischen Messprinzip klassifiziert werden können. Im Automobilbereich kommen heute vor allem Radar, Lidar, Nah- bzw. Ferninfrarot-, Ultraschallsensoren und Kameras zur Anwendung. In Abb. 17.6 wird im oberen und mittleren Bild die eingeschränkte maschinelle Wahrnehmung einzelner Messprinzipien vereinfacht farblich dargestellt. Demgegenüber steht die eingeblendete menschliche Wahrnehmung zusammen mit allen vorgenannten Messergebnissen im unteren Bild bei erschwerten Licht- und Wetterbedingungen (Sonne, Gegenlicht, nasse Fahrbahn, Spritzwasser, Vereisung, Fahrbahnmarkierungen nur teilweise sichtbar). Bei genauer Betrachtung sieht man, dass es sich beim Radarmesspunkt links unten (blau) um eine fehlerhafte Detektion handelt, die von einer Reflexion auf der Gegenfahrbahn stammt (vgl. [38, 39]).

Zudem verdeutlicht Abb. 17.6, dass das Ergebnis maschineller Wahrnehmung und Interpretation komplexer Verkehrssituationen die Entwicklungsingenieure bislang vor erhebliche technische Herausforderungen stellt. Dies betrifft die Detektion von statischen und dynamischen Objekten, ihre möglichst genaue physikalische Vermessung und die Zuordnung der korrekten semantischen Bedeutung der detektierten Objekte (s. Kap. 20).

Abb. 17.6 Maschinelle versus menschliche Wahrnehmung (oberes Bild: Radar in Blau mit Lidar in Gelb, mittleres Bild: Ergänzung mit Kamera-Bildverarbeitung in Grün und Rot, unteres Bild: Überlagerung maschineller mit menschlicher Wahrnehmung)



17.5.2.2 Menschliche versus maschinelle Leistungsfähigkeit

Für differenzierte Potenzialabschätzungen ist ein Vergleich der Leistungsfähigkeit von Mensch und Maschine erforderlich.

Eine Analyse der Wahrnehmungsprozesskette gibt vertiefende Erkenntnisse über menschliche Fehler im Verkehrsgeschehen. Hierzu wird die Bewertung psychologischer Daten aus Verkehrsunfällen herangezogen [40]. Dabei hat sich im Rahmen der interdisziplinären Unfallanalyse eine Fehlerklassifikation mit fünf Kategorien bewährt. Diese Fünf-Schritt-Methode ist eine praxisbewährte Weiterentwicklung des gemeinsam mit GIDAS entwickelten Unfallursachenschemas ACASS (Accident Causation Analysis with Seven Steps) analog dem Sieben-Schritt-Prinzip nach Jens Rasmussen [41]. Mit dieser Methode ist es möglich, menschliche Fehler zu identifizieren, den Zeitpunkt im Verlauf des Wahrnehmungsprozesses vom Informationszugang bis zur Handlung zu bestimmen und die jeweilige Fehlerart zu bewerten (s. Abb. 17.7). Die zugehörigen Fragen betreffen den Informationszugang (Waren relevante Informationen der Verkehrssituation für den Fahrer zugänglich? War das Sichtfeld frei?), die Informationsaufnahme (Hat der Fahrer die Verkehrssituation genau beobachtet und relevante Informationen erkannt?), die Informationsverarbeitung (Hat der Fahrer die Verkehrssituation aufgrund der verfügbaren Informationen korrekt interpretiert?), die Zielsetzung (Hat der Fahrer eine situativ angemessene Entscheidung getroffen?) und die Handlung (Hat der Fahrer die Entscheidung korrekt umgesetzt?). Im Ergebnis zeigt die Unfallanalyse nach dieser Einstufung beim Menschen vorwiegend Fehlerquellen im Informationszugang und bei der Informationsaufnahme (s. Abb. 17.7, [25]).

Für die maschinelle Wahrnehmung nennt Klaus Dietmayer (s. Kap. 20) drei wesentliche Unsicherheitsdomänen, die der menschlichen Informationsaufnahme und Informationsverarbeitung entsprechen. Es handelt sich um die Zustandsunsicherheit, die Existenzunsicherheit und die Klassenunsicherheit. Alle drei haben direkten Einfluss auf die maschinelle Leistungsfähigkeit. Steigen die Unsicherheiten in diesen Bereichen über ein noch zu definierendes

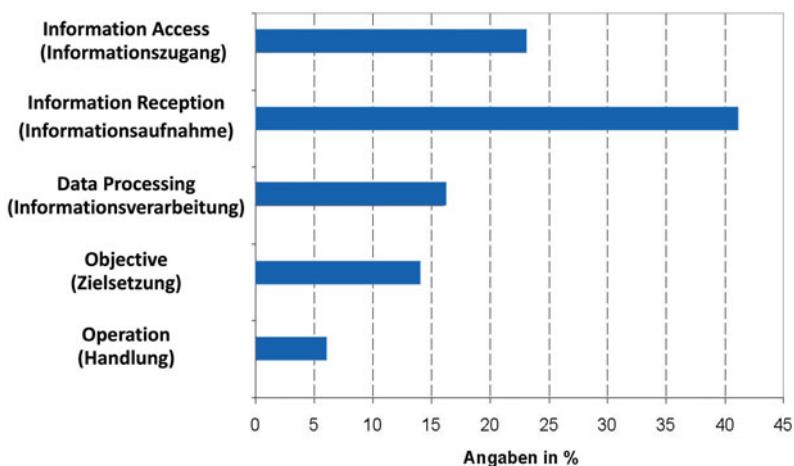


Abb. 17.7 Verteilung menschlicher Fehler im Straßenverkehr (vgl. [25])

tolerables Maß an, ist mit Fehlern innerhalb der Führung des automatisierten Fahrzeugs zu rechnen. Zur Voraussagefähigkeit sind bislang lediglich Trendaussagen möglich.

Die heute bekannten Methoden zur Schätzung von Zustands- und Existenzunsicherheiten erlauben zwar eine aktuelle Einschätzung der Leistungsfähigkeit der maschinellen Wahrnehmung, eine Degeneration der Leistungsfähigkeit einzelner Sensoren oder gar ein Ausfall von Komponenten kann aber prinzipbedingt nicht vorhergesagt werden (s. Kap. 20, S. 432).

17.5.3 Sicherheitspotenzial vollautomatisierter Fahrzeuge bei unabwendbaren Ereignissen

Zusätzlich sind für Betrachtungen des Sicherheitspotenzials vollautomatisierter Fahrzeuge die fortbestehenden Risiken im Bereich komplexer Verkehrssituationen bzw. heute bekannter unabwendbarer Ereignisse zu berücksichtigen. So treten Unfallgefahren an unübersichtlichen Knotenpunkten oder hinter Sichtverdeckungen auf. Bei einer Einzelfalluntersuchung im Rahmen einer Dissertation an der Universität Regensburg wurden Sichtverdeckungen bei einem Anteil von ca. 19 Prozent aller Fälle als Mitursache identifiziert [40]. Beispiele hierfür sind Bäume, Sträucher, Hecken oder hohes Gras. Von einer Verdeckung spricht man auch, wenn beispielsweise ein Kind im Stadtverkehr plötzlich und unerwartet zwischen parkenden Fahrzeugen oder aus einer Hofeinfahrt vor das Fahrzeug läuft.

Bei der vollautomatisierten Fahrzeugführung ist in derartigen Verkehrssituationen eine Prädiktion des aktuellen Bewegungsverhaltens von Objekten in die Zukunft erforderlich. Hier stößt auch die Technik bislang an ihre Grenzen.

Aufgrund der Vielzahl der möglichen und nicht voraussehbaren Ereignisse, insbesondere reaktiver Aktionen anderer Verkehrsteilnehmer, steigen die Unsicherheiten der Situationsprädiktion nach etwa 2 s–3 s so stark an, dass hierauf keine verlässliche Trajektorienplanung mehr möglich ist. (s. Kap. 20, S. 434)

17.6 Fazit und Ausblick

Erkenntnisse aus der Verkehrsunfallforschung bestätigen: Menschliches Versagen ist die Hauptursache von Verkehrsunfällen. Dabei treten insbesondere Fehler im Ablauf des Wahrnehmungsprozesses, bei der Informationsaufnahme und beim Informationszugang auf.

Um aus Unfalldaten das Sicherheitspotenzial hoch- und vollautomatisierter Fahrzeuge abzuschätzen, ist ein differenzierter Vergleich der Gesamtleistungsfähigkeit von Menschen und Maschinen erforderlich. Dieser wird jedoch erst möglich, wenn exakte Kenntnisse über die Funktionsausprägung mit den technischen Grenzen geplanter Serienentwicklungen verfügbar sind.

Statistisch abgesicherte Expertenauswertungen belegen bereits heute das Potenzial zukünftiger sicherheitsunterstützender Fahrzeug- und Fahrerassistenzsysteme. So kann be-

reits vor Entwicklungsbeginn der mögliche Nutzen abgeschätzt werden, und der Automobilhersteller kommt mit der Analyse und Auswertung von Verkehrsunfällen zusätzlich seiner Produktbeobachtungspflicht nach.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse der Analyse von Verkehrsunfällen heute nachweisbar, dass die Automatisierungen von Fahrfunktionen in den Kategorien „driver only“ über „assistiert“ bis zum „teilautomatisierten“ Fahren als Schlüsseltechnologie zur Milderung der Folgen menschlichen Versagens beitragen.

Prognosen zum Sicherheitspotenzial „hoch- und vollautomatisierter“ Fahrzeuge auf der Basis von Verkehrsunfalldaten liefern lediglich Ergebnisse, die auf zahlreichen Annahmen basieren. Dies gilt in besonderer Weise, wenn sie permanent alle Fahraufgaben im Straßenverkehr ohne Fahrerüberwachung übernehmen. Einen Ausblick auf den möglichen Sicherheitseinfluss vollautomatisierter Fahrzeuge gibt eine erste Abschätzung der Daimler-Unfallforschung, die auf mehreren Expertenannahmen basiert. Gemäß dieser Abschätzung lassen sich die Unfallzahlen bis zum Jahr 2070 – unter Annahme einer erfolgreichen Marktdurchdringung – annähernd vollständig reduzieren. Allerdings wurden ausschließlich durch Pkw ausgelöste Unfälle unter Ausschluss physikalischer Grenzen bzw. möglicher technischer Mängel betrachtet. Somit basiert diese Abschätzung auf einigen Annahmen, die zukünftig noch im Detail zu verfeinern und zu validieren sind.

Technische Herausforderungen erschweren derzeit valide Prognosen zum Sicherheitspotenzial. Insbesondere die Wahrnehmung und Interpretation komplexer Verkehrssituationen stellt Entwicklungsingenieure bislang vor erhebliche technische Herausforderungen. Weiterhin wird die Leistungsfähigkeit des Menschen häufig unterschätzt. Fahrerassistenzsysteme gleichen im Wesentlichen anhand von Erkenntnissen aus Verkehrsunfallanalysen die Schwächen menschlicher Fähigkeiten aus. Sie können die Sicherheit in Routinefahrsituationen mit menschlicher Überwachung erhöhen. Dagegen müssen fahrerlose Fahrzeuge zunächst die Fahrfähigkeiten des aufmerksamen menschlichen Fahrers erreichen, um anschließend die Fähigkeiten des Menschen für eine weitere Reduktion der Verkehrsunfallzahlen zu übertreffen. Erst wenn diese technischen Hürden genommen sind, ist eine großflächige Einführung marktreifer vollautomatischer Fahrzeuge zu erwarten.

Zusammengefasst beschränken folgende Aspekte die Aussagefähigkeit der Prognosen zum Sicherheitspotenzial der Automatisierung von „driver only“- bis zu vollautomatisierten Fahrzeugen:

- Bislang ausgewiesene Sicherheitspotenziale von „driver only“ bis hin zu fortgeschrittenen Automatisierungsgraden sind je nach Herkunft der verwendeten Daten mit Bedacht zu beurteilen und zu verwerten. Die Aussagekraft und Prognosefähigkeit des Datenmaterials sind jeweils abhängig von der Auswahl und Bewertung der Merkmale.
- Unterschiedliche Herangehensweisen in Potenzialbewertungen sind unter fachkundiger Betrachtung zu vergleichen. Ein Wirkungsfeld zeigt im Idealfall eine maximal mögliche Vermeidbarkeit von Verkehrsunfällen. Im Gegensatz dazu steht der tatsächlich ausweisbare Nutzen, der deutlich geringer ausfällt.

- Die Aussagefähigkeit von Auswertungsmethoden kann stark variieren: Es macht einen Unterschied, ob ein erfahrener Unfallrekonstrukteur oder -analytiker mit allen Beteiligten sämtlicher Entwicklungsprozesse aktueller Systeme – in Absprache mit Medizinerinnen und Psychologinnen – eingebunden ist oder nicht. Auf der Basis dieser vielschichtigen Hintergrundinformationen erhält er einen Gesamtüberblick über ein komplexes Unfallereignis und kann genauer rekonstruieren bzw. analysieren als ein Kollege ohne dieses Detailwissen.
- Oft entstehen innerhalb einzelner und zwischen mehreren Potenzialbetrachtungen viele Wirkfeldüberschneidungen, die das Gesamtwirkfeld reduzieren.
- Für weiterführende Erkenntnisse sollten vertiefende Erhebungen schwerer Verkehrsunfälle (beispielsweise GIDAS) mit weltweit verfügbaren Verkehrsunfalldaten, Wetterdaten und idealerweise mit Verkehrssimulationen (s. Kap. 15, 16) zusammengeführt werden. Resultierende Ergebnisse dienen der Entwicklung, Auslegung und dem Test sicherer automatisierter Fahrzeuge (s. Kap. 28).
- Ab dem Grad der Hochautomatisierung entfällt – zumindest zeitweise – die Beherrschbarkeit durch die am Unfallgeschehen beteiligten Personen. Damit gewinnen Maßnahmen zur Risikoreduktion für die Gewährleistung der funktionalen Sicherheit bezüglich der elektrisch/elektronischen Komponenten an Relevanz.
- Der Wirkgrad vollautomatischer Fahrzeuge lässt sich derzeit nicht genau quantifizieren, da zahlreiche technische und marktspezifische Faktoren im Detail noch unbekannt sind.
- Anzunehmen ist, dass sich einzelne Unfallszenarien selbst durch Steigerung des Automatisierungsgrades bis hin zur Vollautomatisierung trotz regelkonformer Fahrweise nicht ausschließen lassen. Dies trifft beispielsweise bei fahrphysikalischen Grenzen oder zeitkritischen Situationen zu, wie dem plötzlich vor das Fahrzeug laufenden Kind.

Das Sicherheitspotenzial vollautomatischer Fahrzeuge basiert letztlich auch auf der Annahme, dass über 90 Prozent heutiger Verkehrsunfälle auf menschliches Versagen zurückzuführen sind. Auch wenn die Technik fahrerloser Fahrzeuge niemals eine 100-prozentige Perfektion erreichen wird und dadurch wenige neue bislang unbekannte Unfallkonstellationen entstehen können, scheint die Vision von flächendeckend fahrerlosen Fahrzeugen im Straßenverkehr einen gesellschaftlich erstrebenswerten Nutzen zu versprechen. Deshalb sind Forschungsaktivitäten mit weltweit beteiligten interdisziplinären Experten, die das Thema der Fahrzeugautomatisierung vorantreiben, zu stärken.

Literatur

1. Bengler K, Flemisch F (2011) Von H-Mode zur kooperativen Fahrzeugführung – Grundlegende Ergonomische Fragestellungen, 5. Darmstädter Kolloquium: kooperativ oder autonom? Darmstadt
2. Bengler K, Dietmayer K, Färber B, Maurer M, Stiller C, Winner H (2014) Three Decades of Driver Assistance Systems: Review and Future Perspectives, IEEE Intelligent Transportation System Magazine, ISSN 1939-1390, Volume 6, Issue 4, S. 6–22

3. Katzourakis D, Olsson C, Lazic N, Lidberg M (2013) Driver Steering Override Strategies for Steering based Active Safety Systems, In: FAST-zero 2013 – Second International Symposium on Future Active Safety Technology toward zero-traffic-accident, Nagoya
4. Statistisches Bundesamt (2014) Destatis, Zahlen und Fakten, Wiesbaden
5. Kramer F (2013) Integrale Sicherheit von Kraftfahrzeugen: Biomechanik – Simulation – Sicherheit im Entwicklungsprozess, Vieweg Teubner, Wiesbaden
6. Gasser T, Arzt C, Ayoubi M, Bartels A, Bürkle L, Eier J, Flemisch F, Häcker D, Hesse T, Huber W, Lotz C, Maurer M, Ruth-Schumacher S, Schwarz J, Vogt W (2012) Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung, Wirtschaftsverlag NW, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen F83, Bergisch Gladbach
7. National Highway Traffic Safety Administration – NHTSA (2013) Preliminary statement of policy concerning automated vehicles, Washington DC
8. Society of Automotive Engineers – SAE International (2014) Levels of driving automation for on road vehicles, Warrendale PA
9. National Highway Traffic Safety Administration NHTSA (2014) Fatality Analysis Reporting System (FARS), Washington
10. Amoros E, Brosnan M, Wegman F, Bos N, Perez C, Segui M, Heredero R, Noble B, Kilbey P, Feypell V, Cryer C (2009) Reporting on Serious Road Traffic Casualties, International Traffic Safety Data and Analysis Group – IRTAD, Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), International Transport Forum, Paris
11. Zobel R, Winkle T (2014) Persönliche Kommunikation, Wolfsburg u. Braunschweig
12. Schubert A, Erbsmehl C (2013) Simulation realer Verkehrsunfälle zur Bestimmung des Nutzens für ausgewählte simTD-Anwendungsfälle auf Basis der GIDAS-Wirkfeldanalyse – zur Darstellung eines maximal anzunehmenden Wirkfeldes – von Winkle T, Mönnich J, Bakker J, Kohsiek A (2009), Forschungsbericht simTD, gefördert von den Ministerien BMWI, BMBF, BMVBS, Berlin
13. Burg H, Moser A (2009) Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion, 2. Auflage, Vieweg Teubner, Wiesbaden
14. O’day J (1986) Remarks about U. S. Accident Investigation Programs FARS und NASS. In: Bierau D, O’day J, Grush E, Erfassung und Auswertung von Straßenverkehrsunfalldaten, Forschungsvereinigung Automobiltechnik, Schriftenreihe 54, S. 29–31, Frankfurt (Main)
15. Matthaei R, Reschka A, Rieken J, Dierkes F, Ulbrich S, Winkle T, Maurer M (2015) Autonomes Fahren, In: Winner H, Hakuli S, Lotz F, Singer C (Hrsg.) Handbuch Fahrerassistenzsysteme, 3. Auflage, S. 1146–1168, Vieweg Teubner, Wiesbaden
16. Hummel T, Kühn M, Bende J, Lang A (2011) Fahrerassistenzsysteme – Ermittlung des Sicherheitspotenzials auf Basis des Schadensgeschehens der Deutschen Versicherer, Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. Forschungsbericht FS 03, Berlin
17. Unger T (2013) ADAC Unfallforschung – Fallverteilung, Datenerhebung, Auswertungen, Landsberg/Lech
18. Schittenhelm H, Bakker J, Bürkle H, Frank P, Scheerer J (2008) Methods for analyzing the efficiency of primary safety measures based on real life accident data, ESAR 2008, Hannover
19. Koltze K, Souchkov V (2011) Systematische Innovation: TRIZ-Anwendung in der Produkt- und Prozessentwicklung, Hanser, München, Wien
20. Duden (2014) Die deutsche Rechtschreibung, Bibliographisches Institut, 23. Auflage, Mannheim
21. Daimler AG Communications (2011) Der Weg zum unfallfreien Fahren, COM/M 5836/1635/00/0511, Stuttgart
22. Langwieder K, Gwehenberger J, Hummel T (2003) Benefit Potential of ESP in Real Accident Situations involving Cars and Trucks, 18. International ESV-Conference, Nagoya
23. Zobel R, Friedrich H, Becker H (2000) Accident Research with Regard to Crash Avoidance, Transactions/Vehicle Safety 2000 Conference, London

24. Hörauf U, Buschardt B, Donner E, Graab B, Winkle T (2006) Analyse von Verkehrsunfällen mit FAS-Potenzialeinschätzung am Beispiel des FAS Lane Departure Warning. In Tagung Aktive Sicherheit 2006, Technische Universität München, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, München
25. Chiellino U, Winkle T, Graab B, Ernsberger A, Donner E, Nerlich M (2010) Was können Fahrerassistenzsysteme im Unfallgeschehen leisten? In: Zeitschrift für Verkehrssicherheit 3/2010, TÜV Media GmbH, S. 131–137, Köln
26. Donner E, Winkle T, Walz R, Schwarz J (2007) RESPONSE 3 – Code of Practice für die Entwicklung, Validierung und Markteinführung von Fahrerassistenzsystemen (ADAS). In Technischer Kongress 2007, Verband der Automobilindustrie (VDA), S. 231–241, Sindelfingen
27. Becker S, Schollinski H-L, Schwarz J, Winkle T (2003) Introduction of RESPONSE 2, EU Projekt, In: Maurer M, Stiller C (Hrsg.), 2. Workshop Fahrerassistenzsysteme – FAS2003, Leinsweiler
28. Becker S, Mihm J, Brockmann M, Donner E, Schollinski H-L, Winkle T, Jung C, Dilger E, Kanz C, Schwarz J, Bastiansen E, Andreone L, Bianco E, Frost F, Risch A, Eegher van G, Serval A, Jarri P, Janssen W (2004) Steps towards a Code of Practice for the Development and Evaluation of ADAS, RESPONSE 2, European Commission Public Report, Project Deliverable D3, Brüssel
29. Knapp A, Neumann M, Brockmann M, Walz R, Winkle T (2009) Code of Practice for the Design and Evaluation of ADAS, Preventive and Active Safety Applications, eSafety for road and air transport, European Commission Project, Brüssel
30. Association for the Advancement of Automotive Medicine (2005) The Abbreviated Injury Scale (AIS) Update 2008, Barrington IL
31. International Organization for Standardization (ISO), ISO 26262-3 (2011): Road Vehicles – Functional safety
32. Busch S (2005) Entwicklung einer Bewertungsmethodik zur Prognose des Sicherheitsgewinns ausgewählter Fahrerassistenzsysteme, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 588, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf
33. Klanner F (2008) Entwicklung eines kommunikationsbasierten Querverkehrsassistenten im Fahrzeug, Dissertation, Darmstadt
34. Unselt T, Schöneburg R, Bakker J (2013) Insassen und Partnerschutz unter den Rahmenbedingungen der Einführung autonomer Fahrzeugsysteme, In: 29. VDI/VW-Gemeinschaftstagung „Automotive Security“, Wolfsburg
35. Schubert A, Erbsmehl C, Hannawald L (2012) Standardised Pre-Crash-Szenarios in digital format on the basis of the VUFO Simulation, Dresden
36. Dick R (2011) Die Polizeilichen- Online- Informationssysteme in der Bundesrepublik Deutschland, Books on Demand GmbH, Norderstedt
37. GIDAS – German In-Depth Accident Study – Unfalldatenbank, Dresden, Hannover
38. Becker S, Brockmann M, Jung C, Mihm J, Schollinski H-L, Schwarz J, Winkle T (2004) ADAS – from Market Introduction Scenarios towards a Code of Practice for Development and Evaluation, Final Report, RESPONSE 2 – European Commission, Public Report, Brüssel
39. Donner E, Schollinski H-L, Winkle T, Jung C, Dilger E, Kanz C, Schwarz J, Bastiansen E, Andreone L, Becker S, Mihm J, Jarri P, Frost F, Janssen W, Baum H, Schulz W, Geissler T, Brockmann M (2004) Methods for Risk-Benefit-Analysis of ADAS: Micro Perspective and macroscopic socioeconomic evaluation, RESPONSE 2, European Commission Public Report, Project Deliverable D2, Brüssel
40. Gründl M (2006) Fehler und Fehlverhalten als Ursache von Verkehrsunfällen und Konsequenzen für das Unfallvermeidungspotenzial und die Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen, Dissertation, Regensburg
41. Rasmussen J (1982) Human errors: a taxonomie for describing human malfunction in industrial installations. Journal of Occupational Accidents 4, S. 311–333, Elsevier Scientific Publishing Company, Philadelphia PA