

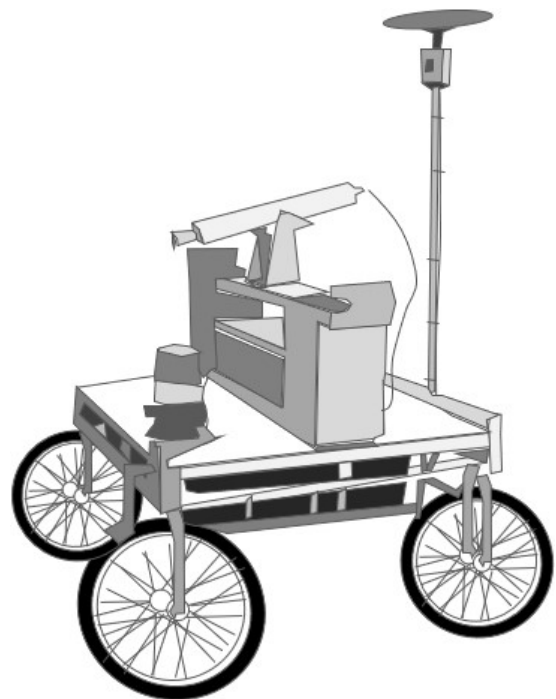
Der blinde Ingenieur Ralph Teetor wollte eine ruhigere Fahrweise von Kraftfahrzeugen erreichen und machte sich Gedanken über eine automatisierte Regelung der Fahrgeschwindigkeit. 1945 wurde sein erstes Geschwindigkeitsregelgerät für Kraftfahrzeuge patentiert. Der Automobilkonzern Chrysler brachte das System 1958 als Zusatzfunktion für Luxusmodelle unter der Bezeichnung „Auto Pilot“ heraus. Bei der Firma Cadillac konnte dieses System als „Cruise Control“ geordert werden [49]. In Europa wurden derartige Geschwindigkeitsregelanlagen erstmals 1962 bei Mercedes-Benz als „Tempomat“ in Automobilen eingesetzt [58].

Auch über eine automatisierte Fahrzeuglenkung hatten sich Anfang des 20. Jahrhundert viele Automobil-Ingenieure den Kopf zerbrochen. Als 1925 ein Kraftfahrzeug ohne Fahrer durch New York City fuhr, schien sich der Traum vom autonomen Fahren bereits erfüllt zu haben. Allerdings wurde dieses Wunderfahrzeug von einem Menschen aus einem dahinter herfahrenden Auto funkgesteuert [13].

Grundsätzlich verfolgten Wissenschaftler zwei unterschiedliche Ansätze zur Verwirklichung von selbstlenkenden Fahrzeugen. Ein Teil der Forschenden wollte dies mit der sogenannten „Elektronischen Fahrbahn“, einer Fahrbahn mit integrierten Metalldrähten, verwirklichen. Die durch den Draht erzeugten elektromagnetischen Felder sollten die Fahrzeugsteuerung übernehmen. 1960 gelang es in den USA erstmals, dass Testfahrzeuge der durch einen solchen Draht vorgegebenen Fahrtrichtung automatisch folgen konnten [34]. Wegen des enormen technischen Aufwands zur Ausstattung der Fahrbahn mit Leitdrähten wurden diese Experimente nur auf wenigen Teststrecken erprobt.

An einem alternativen Konzept für ein selbststeuerndes Fahrzeug arbeiteten zur gleichen Zeit Studierende an der Stanford University. Ein kleines Forschungsfahrzeug wurde mit einer Videokamera ausgestattet und konnte sich entlang einer Fahrbahnmarkierung bewegen. Dieses sogenannte „Stanford Cart“ wurde im Laufe der Zeit mit immer besseren Algorithmen und Bilderkennungssystemen gesteuert [14] » Abb. 30.

In seiner letzten Entwicklungsstufe Ende der 1970er Jahre konnte sich das Fahrzeug ohne menschliche Einflussnahme fünf Stunden lang kreuz und quer durch einen mit Stühlen ausgestatteten Saal ohne Kollision bewegen [14]. Den Sprung zu einem autonomen Kraftfahrzeug mit Passagieren schaffte im Jahre 1977 das Tsukubas Mechanical Engineering Laboratory in Japan. Zwei auf dem Fahrzeug montierte Videokameras filmten die Fahrbahn und ein Computer errechnete aus der Videoaufnahme das erforderliche Fahrmanöver [12].

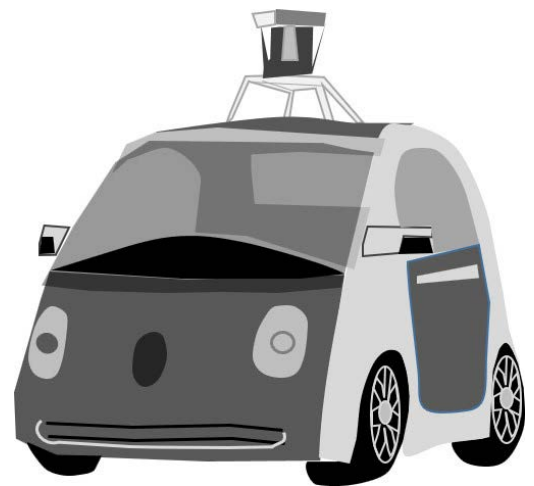


» Abb. 30 Stanford Cart

Als Pionier im Bereich des autonomen Fahrens gilt auch Ernst Dieter Dickmanns, der von 1975 bis 2001 an der Universität der Bundeswehr München forschte und unterrichtete. In den frühen 1980er-Jahren experimentierte Dickmanns mit Versuchsfahrzeugen zunächst auf Autobahnen, die noch nicht für den Verkehr freigegeben waren. Ab 1986 konnte ein Versuchsfahrzeug bereits auf einem verkehrsreichen Autobahnabschnitt teilweise autonom fahren. Ein menschlicher Fahrzeuglenker, der als Sicherheitsfahrer im Auto saß, musste allerdings noch häufig eingreifen und Kurskorrekturen durchführen. 1994 absolvierten Versuchsfahrzeuge auf der Basis von Daimler-Benz eine autonome Fahrt auf einer mehr als 1000 Kilometer langen Autobahnroute und erreichten dabei Geschwindigkeiten von über 130 km/h. Diese Fahrzeuge konnten bereits automatisch Spurwechselmanöver ausführen [12].

Ab 2010 erkennen viele Firmen und Automobilkonzerne Fahrzeuge ohne Person am Steuer als ein lukratives Geschäftsmodell und verstärken ihre Forschungsaktivitäten. 2012 wird ein autonomes Fahrzeug der Firma Google präsentiert [33] » Abb. 31. 2015 bringt Tesla ein Serienfahrzeug mit hochautomatisierten Steuerungsfunktionen in Längs- und Querrichtung auf den Markt [30]. Ein autonomer Bus der Firma EasyMile wird 2017 in Bad Birnbach im Linienverkehr eingesetzt [40]. Die Firma Waymo, die von Google die Entwicklung autonomer Fahrzeuge übernommen hat, bietet erstmals 2020 in Arizona einen Service mit fahrerlosen Taxis an [37]. Ein Jahr später folgen im US-Bundesstaat Kalifornien die Robotaxis von Cruise, einer Tochterfirma von General Motors [28]. Daneben laufen noch zahlreiche Pilotprojekte mit autonomen Fahrzeugen auf öffentlichen Straßen. Ende 2020 demonstriert die Firma Mobileye, eine Intel-Tochter, dass eine einstündige Fahrt im Norden von München ohne das Eingreifen des Sicherheitsfahrers funktioniert [35].

Heute ist ein hoher Anteil der neuen Kraftfahrzeuge mit Assistenzsystemen und automatisierten Fahrfunktionen ausgestattet. Der Traum vom autonomen Fahren ist aber bis heute noch nicht ganz in Erfüllung gegangen. Denn die in Serienfahrzeuge verbauten Fahrsysteme erfordern immer noch eine aufmerksame Person hinter dem Lenkrad, die binnen Sekunden die Steuerung beispielsweise bei Fehlfunktionen oder unerwarteten Situationen übernehmen kann.



» Abb. 31 Autonomes Google-Auto

3.2 Funktionsprinzip autonomer Fahrzeuge

Automationsstufen

Die Society of Automotive Engineers (SAE) hat eine Taxonomie entwickelt, die in Abhängigkeit vom Automationsgrad der Fahrfunktionen insgesamt folgende sechs Automationsstufen unterscheidet [44]:

Level 0:	No Driving Automation (keine Automation)
Level 1:	Driver Assistance (Fahrerassistenz)
Level 2:	Partial Driving Automation (teilweise Automation der Fahrfunktion)
Level 3:	Conditional Driving Automation (bedingte Auto- mation der Fahrfunktion)
Level 4:	High Driving Automation (hohe Automation der Fahr- funktion)
Level 5:	Full Driving Automation (vollständige Automation der Fahrfunktion)

Entscheidend für diese SAE-Einstufung ist die Rolle des menschlichen Fahrers bei der Ausübung seiner Fahraufgaben. Außerdem gelten die Automations-Stufen ausschließlich für Fahrfunktionen, die in einem bestimmten Betriebsfall bewusst aktiviert wurden und über einen längeren Zeitraum hinweg wirken. Notsysteme, die in gefährlichen Situationen nur wenige Sekunden in die Fahrfunktion eingreifen, bleiben in dieser Taxonomie unberücksichtigt. Denn hier wird keine grundsätzlich veränderte Rolle des Menschen in seiner Fahraufgabe gesehen. Nicht in diese Einstufung einbezogen sind außerdem Systeme, die den Fahrzeuglenker vor Gefahren warnen, aber keine Fahrfunktion direkt ansteuern.

Ab Level 4 muss sich das Fahrzeug bei Störungen und beim Erreichen von Systemgrenzen selbstständig in einen „risikominimalen Zustand“ versetzen können, zum Beispiel indem es seine Geschwindigkeit verringert oder in einem möglichst sicheren Straßenbereich anhält. Das autonome Fahren ist also nur bei Erreichen der beiden höchsten Stufen (Level 4 und 5) verwirklicht, wenn auf Menschen als Kontrollinstanz oder Rückfallebene verzichtet werden kann.

Bevor darauf eingegangen wird, welche Konsequenzen der Verzicht auf den Menschen als Rückfallebene in Bezug auf Verkehrssicherheit und Haftung bei einem Systemversagen hat, sollte man sich das Steuerungskonzept eines autonomen Fahrzeugs in den Grundzügen vor Augen führen.

Steuerungskonzept autonomer Fahrzeuge

Die Informationsverarbeitung autonomer Fahrzeuge kann grundsätzlich in drei Ebenen unterteilt werden [9, 46]:

- » Wahrnehmungsebene
- » Planungsebene
- » Ausführungsebene

Am Beginn der automatisierten Fahrfunktion steht die Wahrnehmungsebene. Sensoren tasten die Umgebung des autonomen Fahrzeugs ab und verorten diese Daten in einem Koordinatensystem. Nach einer Plausibilitätskontrolle werden die unterschiedlichen Sensordaten zusammengeführt und in Echtzeit zu einem virtuellen Umfeldmodell kombiniert, das alle relevanten, bewegten und festen Objekte enthält. Das Umfeldmodell dient in der Planungsebene als Basis für die Berechnung des Fahrpfades des autonomen Fahrzeugs. Anschließend wird der errechnete Fahrpfad in entsprechende Signale für die Fahrzeugsteuerung in Längs- und Querrichtung übersetzt [29].

Diese drei Ebenen der Informationsverarbeitung autonomer Fahrzeuge werden im Folgenden genauer beschrieben.

Hochautomatisiertes und autonomes Fahren setzt ein zuverlässiges System von Sensoren voraus (**Wahrnehmungsebene**), das alle relevanten Informationen der Umgebung detektiert. Die Sensorik autonomer Fahrzeuge besteht meist aus mehreren verschiedenen Komponenten, die redundant sind und sich im Idealfall gegenseitig ergänzen sollten [29].

Videokameras erfassen die Umwelt auf ähnliche Weise wie das menschliche Auge. Sie haben eine relativ hohe Auflösung und können Farbunterschiede an Oberflächen von Objekten gut erkennen. Dies ist entscheidend für die richtige Klassifizierung von Objekt- und Merkmalstypen. Die räumliche Verteilung und Geschwindigkeit

von Objekten kann aber selbst bei stereoskopischen Bildern nur sehr ungenau ermittelt werden. Bei ungünstiger Witterung kann sich die Wahrnehmungsfähigkeit von Videokameras deutlich verringern.

Radar-Sensoren (radio detection and ranging) ermöglichen das präzise Erkennen und Vermessen dynamischer Objekte selbst bei widrigsten Wetterbedingungen wie Starkregen oder Nebel. Voraussetzung für eine ausreichende Erfassung ist, dass ein Objekt geeignete Reflexionseigenschaften aufweist – es sollte also im Idealfall aus Metall bestehen. Eine Kategorisierung der Objekte nach ihrer Gestalt ist wegen des relativ groben Rasters der Radarwellen nur eingeschränkt möglich.

Lidar-Sensoren (light detection and ranging) senden Laserblitze aus und detektieren die zurückstrahlenden Lichtreflexe. Sie erzielen auch bei Dunkelheit noch eine gute Erfassungswirkung und haben aufgrund der Vielzahl an Laserimpulsen eine wesentlich höhere Auflösung als Radar-Sensoren. Bei Starkregen und Nebel sinkt die Erfassungsgenauigkeit, weil das Laserlicht durch Wassertropfen teilweise reflektiert wird. Die Kontur von filigranen Objekten wie z.B. von Fahrrädern kann Lidar besser identifizieren als Radar. Ähnlich wie bei Radar-Sensoren können Lidar-Sensoren die Entfernung und Geschwindigkeit von Objekten direkt ermitteln. Nachteilig ist, dass Lidar-Sensoren Farbunterschiede an Objektflächen nicht wahrnehmen können und im Vergleich zu Radar-Sensoren oder Video-Kameras deutlich teurer sind.

Ultraschall-Sensoren haben sich im Nahbereich bewährt, weil sie Abstände zu Objekten zentimetergenau erfassen können. Sie kommen vor allem beim Rückwärtsfahren und automatisierten Einparken zum Einsatz.

Nicht fehlen darf in einem autonomen Fahrzeug ein Akustik-Sensor oder Mikrofon. Im öffentlichen Verkehr werden akustische Warnsignale genutzt, um auf Gefahren hinzuweisen oder den Verkehr zu regeln, z.B. an Bahnübergängen, aber auch das Martinshorn auf Einsatzfahrzeugen muss erkannt werden.

Daneben sind in autonomen Fahrzeugen weitere Sensor-Typen verbaut, beispielsweise zur Positionsermittlung und Beschleunigungsmessung des eigenen Fahrzeugs.

Ein wichtiger Aspekt in der Wahrnehmungsebene ist die Klassifizierung der detektierten Objekte. Die Sensordaten werden an einen Prozessor weitergeleitet und über Algorithmen verschiedenen Verkehrsteilnehmergruppen oder sonstigen Objektklassen zugewiesen. Moderne Videokamerasysteme können Objekte oft schon direkt an der Sensoreinheit über Bilderkennungsprogramme klassifizieren. Übermitteln verschiedene Sensoren widersprüchliche Daten, werden un plausible Werte herausgefiltert. Bei dynamischen Objekten wird zusätzlich noch die Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung bestimmt. Die Geschwindigkeit, mit der sich ein Objekt auf das autonome Fahrzeug zu- bzw. von ihm wegbewegt, kann mit Radar- bzw. Lidar-Sensoren relativ gut direkt bestimmt werden. Komplizierter ist die Bestimmung der Geschwindigkeit in Querrichtung. Die Dynamik der Querbewegung kann beispielsweise über Vergleich und Verfolgung von Bildsequenzen, das sogenannte „Tracking“, abgeschätzt werden. Tracking verwendet spezielle Filterfunktionen, um die rohen Sensordaten zu verstetigen und fehlende Objektdaten infolge von Objektverdeckungen zu ergänzen [29].

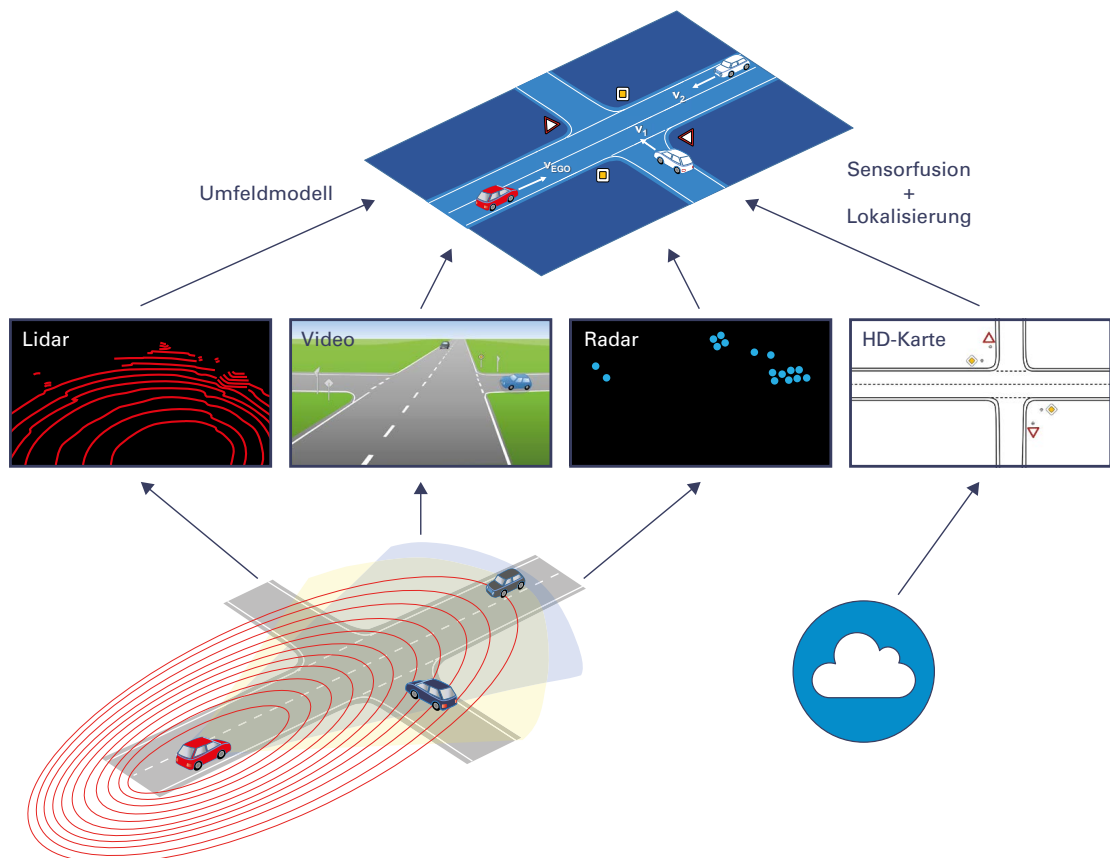
Im nächsten Schritt erfolgt die Lokalisierung des autonomen Fahrzeugs und der Objekte in der Umgebung. Autonome Fahrzeuge müssen ihre absolute Position allein schon deswegen kennen, um den beabsichtigten Zielort zuverlässig zu erreichen. Dazu genügt eine gewöhnliche Satellitennavigation mit einer Genauigkeit von wenigen Metern. Für eine exakte Zuordnung der Verkehrsteilnehmer oder Verkehrszeichen zu bestimmten Fahrstreifen ist allerdings eine Genauigkeit im Zentimeterbereich erforderlich [29, 55]. Dieser Grad der Genauigkeit kann durch den Abgleich bestimmter Merkmale der Umgebung (z.B. Verkehrszeichen als „Landmarken“) mit hochpräzisen digitalen Karten sowie einer exakten Referenzierung beispielsweise mit dem differenzialen globalen Positionierungssystem (DGPS) erreicht werden [11].

Diese Methode der Lokalisierung hat mehrere grundlegende Nachteile. Wegen des dazu benötigten hohen Detaillierungsgrads der digitalen Karten ist viel Speicherkapazität pro Kilometer Straße und eine entsprechend hohe Rechnerleistung erforderlich. Dazu kann diese aufwendige Karte aus Kostengründen nur in sehr unregelmäßigen und großen Zeitintervallen aktualisiert werden. Deswegen können kurzzeitige Änderungen der Verkehrsführungen aufgrund von Arbeitsstellen in digitalen Karten nicht dargestellt werden [31, 55]. Zudem können die für die Lokalisierung wichtigen Landmarken beseitigt oder durch Verkehrsteilnehmer verdeckt sein. Innerhalb von Häuserschluchten in städtischen Gebieten oder im Bereich von Tunneln ist ein Empfang des DGPS nicht oder nur eingeschränkt gewährleistet [55].

Eine alternative Möglichkeit zur Lokalisierung von Objekten im Zentimeterbereich, die ohne ein hochgenaues Navigierungssatellitensystem auskommt, stellt das permanente Vergleichen der 3D-Punktwolke des fahrzeuggebundenen Lidar-Sensors mit einer hochgenauen georeferenzierten Straßenkarte dar. Wenn die beste Übereinstimmung der Lidar-Punktwolke mit Landmarken in der vordefinierten Straßenkarte gefunden ist, kann die genaue Position mithilfe der georeferenzierten Karte bestimmt werden [29].

Nach [31] hat die Firma Mobileye mit dem sogenannten Road Experience Management (REM™) eine Methode entwickelt, um eine sehr aktuelle digitale Karte zu gewährleisten. Mobileye speichert die bereits klassifizierten und lokalisierten Objekt-Daten seiner Video-Sensoren, die millionenfach in Serienfahrzeugen eingebaut sind, anonymisiert in einer Cloud ab. Bei diesem als „crowd sourcing“ und „harvesting“ bezeichneten Vorgang werden pro Fahrzeug nur wenige wichtige Elemente wie Straßenränder, Markierungen und Verkehrszeichen abgespeichert. Die Befahungsdaten werden kontinuierlich in einer als „Roadmap“ bezeichneten digitalen Karte aggregiert. Die Karte aktualisiert sich bei der Durchfahrt von Fahrzeugen mit Mobileye-Sensoren automatisch und ist somit zumindest auf Straßen mit hoher Verkehrsbelastung sehr aktuell. Diese Karte liefert einem autonomen Fahrzeug neben Informationen zu Fahrbahnrändern und wichtigen statischen Objekten der Straßenausstattung auch Hinweise zur mittleren Lage der Fahrspur und zur durchschnittlichen Fahrgeschwindigkeit, der zuvor auf dieser Strecke durchgeführten Kraftfahrzeuge.

» Abb. 32
Wahrnehmungsebene

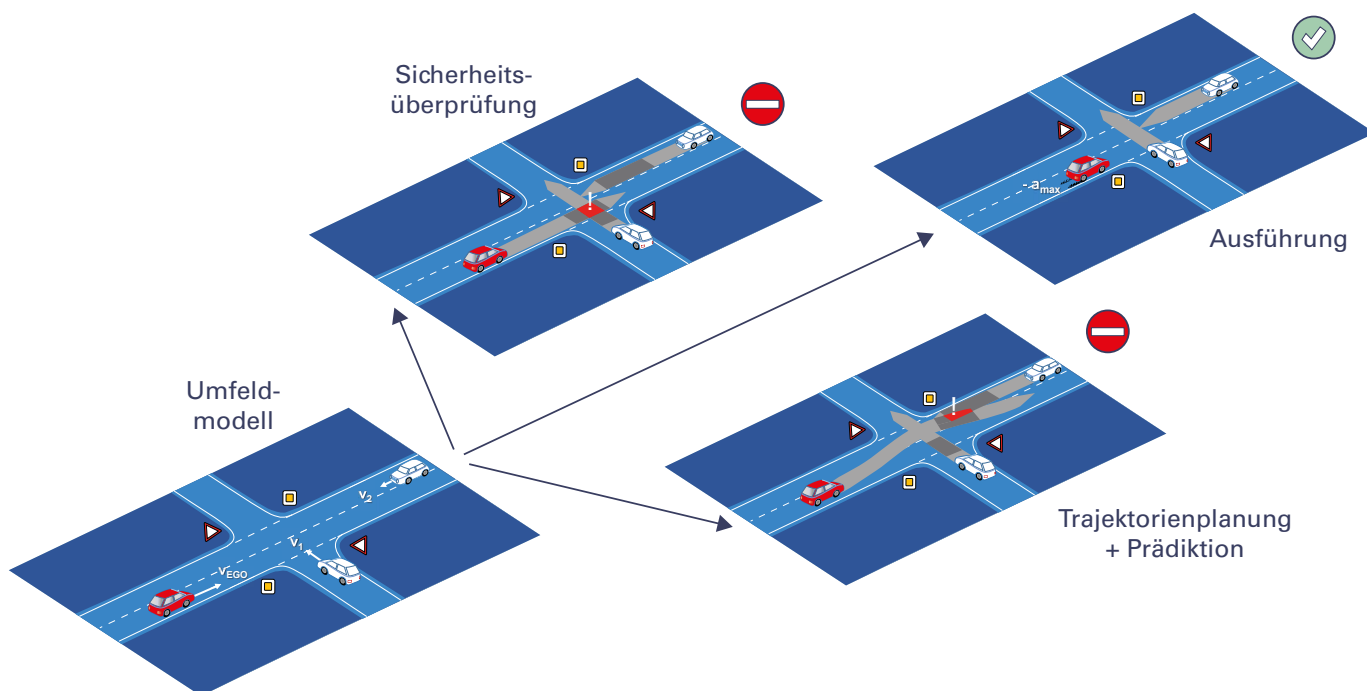


Nach der Kategorisierung und Lokalisierung fasst ein Prozessor alle statischen und dynamischen Sensordaten sowie die Daten der Hintergrundkarte zusammen – auch Sensorfusion genannt – und erstellt daraus ein virtuelles Umfeldmodell
 » Abb. 32. Dieses Modell dient als Grundlage für die Planungsebene.

In der **Planungsebene** wird das Fahrmanöver des autonomen Fahrzeugs unter Berücksichtigung der umgebenden statischen und dynamischen Objekte und unter Einbeziehung der Navigationsziele geplant. Ergebnis ist ein zeitreferenzierter Fahrpfad, die sogenannte Trajektorie. Die gewünschte Fahrtroute bis zum gewählten Zielort kann mit Hilfe von Satellitennavigation und digitaler Straßenkarte in eine Trajektorie umgerechnet werden. Der Planungshorizont dieser Navigationsaufgabe umfasst meist einen relativ langen Zeitraum und wird auch „Missionsplanung“ genannt. Daneben müssen für kurzfristige taktische Manöver wie Anhalten, Ausweichen, Fahrstreifenwechsel oder Einfädelvorgänge ebenfalls geeignete Fahrpfade ausgeführt werden [9].

Die Fahrstrategie besteht darin, für das autonome Fahrzeug in jeder Verkehrssituation eine kollisionsfreie und sicher zu befahrende Trajektorie zu finden. Diese muss wegen der sich ständig wechselnden Objekte der Umgebung in sehr kurzen Zeitintervallen immer wieder neu berechnet werden [46]. Moderne Steuerungssysteme autonomer Fahrzeuge schaffen dies in einer Frequenz von zehn Berechnungsschritten pro Sekunde [46, 50]. Sowohl die Navigationsaufgabe als auch das künftige Verhalten des Umfelds muss in die Trajektorienplanung einbezogen werden [55]. Eine Vorhersage der zeitlichen Entwicklung der umgebenden dynamischen Objekte („Prädiktion“) ist allerdings nur für einen Zeithorizont von maximal einer Sekunde ausreichend genau [32]. Bei längeren Prognosezeiträumen hilft das Erkennen von bekannten Bewegungsmustern oder auch das richtige Deuten von bestimmten Verkehrsszenarien („Szenenverständnis“), die Genauigkeit der Vorhersage zu erhöhen. Beispielsweise müssen Personen in der Nähe eines Fußgängerüberwegs als potentiell gefährliche Situation erkannt werden [11].

» Abb. 33
 Planungsebene



Insbesondere für Ausweich- oder Spurwechselmanöver ergibt sich meist ein ganzes Bündel von fahrbaren Trajektorien. Zur Auswahl der sichersten Fahrlinie findet daher eine Sicherheitsüberprüfung statt. Dazu werden mit unterschiedlichen Metriken die vorhergesagten Trajektorien für das autonome Fahrzeug und für alle umgebende dynamischen Objekte hinsichtlich ihrer Kollisionswahrscheinlichkeit bewertet » [Abb. 33](#). Eine häufig verwendete Metrik ist die Time-to-Collision (TTC). Sie gibt die Zeit bis zu einer möglichen Kollision des autonomen Fahrzeugs mit einem anderen Objekt an, wenn keine Veränderung der Fahrgeschwindigkeiten oder der Bahnkurven stattfindet [\[54\]](#). Bei anderen Sicherheitsüberprüfungsmethoden werden feste Beschleunigungs- bzw. Verzögerungswerte für bestimmte Szenarien vorgegeben und daraus die erforderlichen Sicherheitsabstände berechnet. In probabilistischen Ansätzen werden für bewegte Objekte Räume errechnet, die mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit erreicht werden können. Die Sicherheitsüberprüfung zielt in diesem Fall darauf ab, eine Überlappung der erreichbaren Räume und damit eine Kollision mit hoher Wahrscheinlichkeit zu vermeiden [\[32\]](#).

In den oben genannten Fällen werden in der Prädiktion alle umgebende Objekte als Gefahrenquelle aufgefasst, was zu einer sehr defensiven Fahrweise des autonomen Fahrzeugs führen kann. Eine dichtere Nutzung des befahrbaren Bereichs, beispielsweise zum Einfädeln bei starkem Verkehr, lässt sich nur durch eine bessere Kooperation des autonomen Fahrzeugs mit anderen Verkehrsteilnehmern erreichen [\[17\]](#). Ein alternativer Ansatz für eine optimierte Fahrweise könnte darin bestehen, die mittels mathematischer Formeln berechneten Sicherheitsabstände mit semantischen Regeln zu ergänzen [\[50\]](#).

Am Ende der Informationsverarbeitung von automatisierten Fahrfunktionen ist es die Aufgabe der Ausführungsebene, exakte Steuerbefehle zum Lenken, Bremsen und Beschleunigen des autonomen Fahrzeugs zu geben und dieses entlang der berechneten Trajektorie zu führen. Dabei muss nicht nur eine sichere Fahrzeugführung, sondern auch ein guter Fahrkomfort erreicht werden [\[55\]](#). Damit die Ansteuerung nicht als ruckartig empfunden wird, erfolgt sie meist hochfrequent etwa alle 10 Millisekunden [\[46\]](#). Zum Aufgabenbereich der Ausführungsebene gehören auch stabilisierende Maßnahmen (z.B. bei Seitenwind oder bei großer Querneigung) und weitere Aufgaben wie das Betätigen des Blinkers oder das Hupen bei Gefahr [\[9\]](#).

3.3 Sicherheitsüberprüfung autonomer Fahrzeuge

Allgemeine Grundlagen

Alle Aufgaben der Wahrnehmungsebene, Planungsebene und Ausführungsebene werden von einem autonomen Fahrzeug selbstständig ausgeführt. Ob autonome Fahrzeuge deswegen weniger Unfälle verursachen als von Menschenhand gesteuerte Fahrzeuge, ist damit noch nicht geklärt. Im Jahr 2017 hat die vom Bundesverkehrsminister eingesetzte Ethik-Kommission „Ethische Regeln für den automatisierten und vernetzten Fahrzeugverkehr“ aufgestellt. Regel Nummer 1 besagt, dass teil- und vollautomatisierte Systeme „zuerst der Verbesserung der Sicherheit aller Beteiligten im Straßenverkehr“ dienen sollen. Erst in zweiter Linie soll es „um die Steigerung von Mobilitätschancen und die Ermöglichung weiterer Vorteile“ gehen. Unter Nummer 2 wird betont, dass die Zulassung automatisierter Systeme nur dann vertretbar sei, „wenn sie im Vergleich zu menschlichen Fahrleistungen zumindest eine Verminderung von Schäden im Sinne einer positiven Risikobilanz verspricht.“ [8]. Für einen statistisch gesicherten Nachweis, dass ein autonomes Fahrzeug weniger tödliche Unfälle verursacht als ein Mensch am Steuer, müssten Testfahrzeuge mehrere Milliarden Kilometer unfallfrei zurücklegen. Zudem wäre bei jeder Änderung am Steuerungs-Algorithmus eine Wiederholung der Testreihe erforderlich [50]. Dies ist mit einer geringen Anzahl von Testfahrzeugen innerhalb einer vernünftigen Zeit nicht zu bewerkstelligen. Deswegen haben sich bereits viele Forschungsarbeiten damit beschäftigt, wie dennoch eine effiziente Sicherheitsüberprüfung für autonome Fahrzeuge verwirklicht werden könnte.

Bei der Sicherheitsüberprüfung des Regelsystems eines autonomen Fahrzeugs muss grundsätzlich zwischen funktionaler und nominaler Sicherheit unterschieden werden.

Die funktionale Sicherheit befasst sich mit der Zuverlässigkeit der mechanischen, elektrischen und elektronischen Bauteile, die beim Versagen Gefahrensituationen auslösen können.

Dagegen gewährleistet die nominale Sicherheit, dass das beabsichtigte Fahrmanöver so konzipiert und programmiert ist, dass keine Gefährdung auftritt, solange die funktionale Sicherheit gegeben ist – also keine technische Störung vorliegt [43, 50].

Während die Prüfkriterien zur funktionalen Sicherheit durch ISO-Normen geregelt sind, ist das Vorgehen zur Überprüfung der nominalen Sicherheit noch nicht abschließend durch ein Regelwerk festgelegt. Die nominale Sicherheit bezieht sich beim autonomen Fahrzeug im Wesentlichen auf die Erfassung von Objekten und Ereignissen sowie auf die dadurch ausgelöste Reaktion, abgekürzt OEDR (Object and Event Detection and Response). Die Sicherheitsüberprüfung muss demnach gewährleisten, dass das System alle relevanten Objekte und Ereignisse korrekt erfasst und ein geeignetes Fahrmanöver auslöst. Dies muss für die gesamte zulässige Betriebsdomäne des autonomen Fahrzeugs, die sogenannten ODD (Operational Design Domain), erfüllt sein. Die ODD kann zum Beispiel umweltbedingten, geografischen und tageszeitlichen Einschränkungen unterliegen oder bestimmte Verkehrs- und Fahrbahnmerkmale voraussetzen.

Methoden der Sicherheitsüberprüfung

Zur Sicherheitsüberprüfung von Assistenzsystemen wie beispielsweise ACC (Adaptive Cruise Control) oder AEBS (Advanced Emergency Braking System) werden funktionsbasierte Methoden eingesetzt. Für diese Systeme legt man einzelne Tests fest, um die grundlegenden Funktionalitäten zu bestätigen. Voraussetzung ist, dass die Funktionalität in jeder vernünftigerweise anzunehmenden Situation definiert ist. Das stellt jedoch bei Fahrfunktionen autonomer Fahrzeuge eine nicht leistbare Aufgabe dar, weil eine unendlich große Anzahl verschiedener Verkehrssituationen auftreten kann [43].

Ein vielversprechender Ansatz zur Abschätzung der Verkehrssicherheit von autonomen Fahrzeugen ist die sogenannte szenarienbasierte Sicherheitsüberprüfung. Zum Begriff Szenario finden sich in der Fachliteratur verschiedene Definitionen. Nach [43] ist ein Szenario eine zeitliche Abfolge von Szenenelementen einschließlich der Aktionen und Ereignisse der teilnehmenden Elemente, die eine Zeitdauer von etwa zehn Sekunden umfasst. Unter Aktionen und Ereignissen versteht man beispielsweise Fahrmanöver wie das Hineinschneiden in den Fahrstreifen oder das Folgen eines vorausfahrenden Fahrzeugs. Zu den Elementen werden unter anderem Straßentrasierung, Verkehrsteilnehmerarten, statische und dynamische Objekte sowie Umfeldbedingungen gezählt [19].

Grundvoraussetzung für eine szenarienbasierte Sicherheitsüberprüfung ist eine ausreichend große Zahl an Szenarien. Zur Generierung von Szenarien kann auf abstraktes Expertenwissen, auf Richtlinien für die Anlage und den Betrieb von Straßen (z.B. die RAA, RAL, RAS, RSA), auf Unfall- und Verkehrsdaten sowie auf Erkenntnisse aus Umfragen zurückgegriffen werden. Eine andere Quelle für Szenarien stellen die gespeicherten Fahrzeugdaten von Testfahrten dar [43]. Je nach Detaillierungsgrad und Maschinenlesbarkeit können die so gewonnenen Szenarien in funktionale, logische und konkrete Szenarien aufgeteilt werden. Funktionale Szenarien werden lediglich verbal (eventuell verdeutlicht durch eine Skizze) beschrieben und beinhalten keine genauen Parametergrößen » Abb. 34. In logischen Szenarien werden Parameterbereiche definiert (z.B. Fahrstreifenbreite von 2,5 – 3,0 m) und in

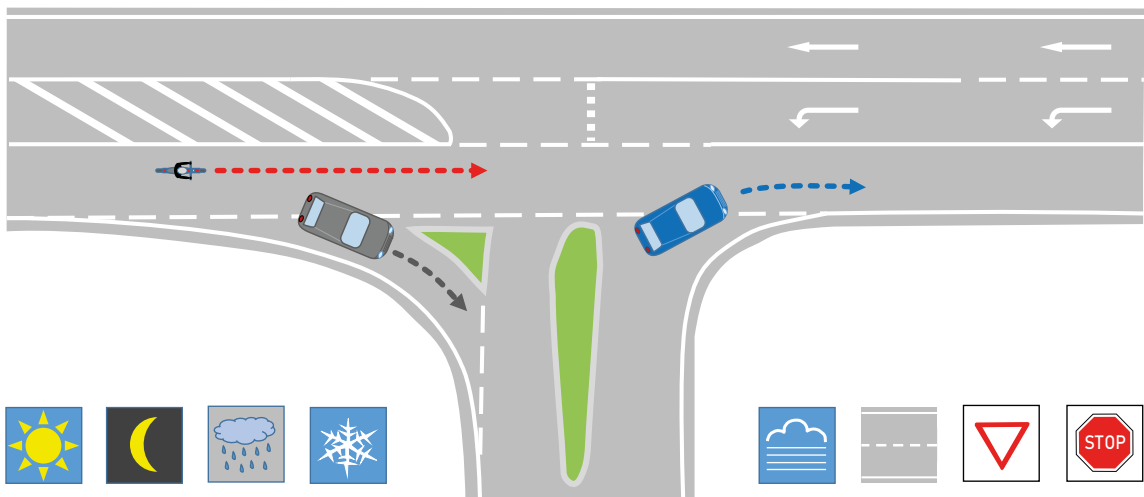
konkreten Szenarien sind exakte Parameterwerte vorgegeben [19, 43]. Somit kann durch die Wahl konkreter Werte aus den Parameterbereichen eines logischen Szenariums ein konkretes Szenario erzeugt werden [19].

Die generierten Szenarien müssen nun nach einem einheitlichen und nachvollziehbaren Schema klassifiziert und in einer Datenbank abgespeichert werden. Im PEGASUS-Projekt werden sechs unabhängige Ebenen für eine systematische Beschreibung von Szenarien vorgeschlagen [10]:

1. Straßengeometrie
2. Straßenausstattung und Verkehrsregeln
3. Temporäre Veränderungen und Ereignisse (z.B. Arbeitsstellen)
4. Dynamische Objekte (verkehrsrelevante Objekte wie Kfz- und Fußverkehr)
5. Umfeldbedingungen (z.B. Lichtverhältnisse, Fahrbahnglätte)
6. Digitale Informationen (c2x, digitale Karten)

Bei der Sicherheitsüberprüfung eines autonomen Fahrzeugs werden alle Szenarien, die für die ODD relevant sind, ausgewählt und in einem Szenarien-Katalog gesammelt. Es muss gewährleistet sein, dass im Szenarien-Katalog neben den Grundszenarien auch alle denkbaren kritischen und komplexen Szenarien enthalten sind. In kritischen Szenarien treten Aktionen auf, in denen das autonome Fahrzeug ein Notbrems- oder Notausweichmanöver ausführen muss. Komplexe Szenarien enthalten beispielsweise Situationen mit dichtem Verkehr, untypischer Straßengestaltung oder außergewöhnlichen Witterungsereignissen [15].

» Abb. 34
Beispiel eines
funktionalen
Szenarios



Mit einer zufälligen Stichprobe werden aus dem Szenarien-Katalog mehrere Szenarien für eine Sicherheitsüberprüfung ausgewählt und dafür verschiedene Kombinationen von Testparametern festgelegt. Dies soll vermeiden helfen, dass in der Fahrzeugentwicklung eine Optimierung für wenige Testfälle vorgenommen wird („overfitting“) und somit die erzielten Messergebnisse nur unzureichend das Fahrverhalten im realen Verkehr widerspiegeln [15].

Als Testmethoden bieten sich Simulationen, Überprüfungen auf Teststrecken und Testfahrten auf öffentlichen Straßen an. Jede dieser Methoden hat ihre Schwächen und Stärken. Simulationen haben den Vorteil, dass ohne großen Zeit- und Kostenaufwand sehr viele Testläufe möglich sind. Zudem lassen sich Szenarien – auch mit besonders gefährlichen Aktionen – mit mehreren Fahrzeugen simulieren. Allerdings muss die Übereinstimmung des Simulationsprogramms mit den Abläufen im realen Verkehr sorgfältig durch Vergleichstests auf Teststrecken oder in Testfahrten nachgewiesen werden. Die Überprüfung auf Teststrecken ist mit entsprechenden Sicherheitsvorkehrungen auch für kritische Szenarien durchführbar. Die Variationsbreite der Szenarien wird allerdings durch die baulichen und technischen Möglichkeiten des Testgeländes eingeschränkt. Testfahrten sind eine sehr wirklichkeitsgetreue Methode der Sicherheitsüberprüfung, mit der man auch Verhaltensmuster wie zum Beispiel das Einfädeln im dichten Verkehr oder das Befahren komplexer Knotenpunkte realitätsnah überprüfen kann. Nachteilig ist, dass für Testfahrten ein hoher Zeit- und Kostenaufwand entsteht und eine Gefährdung anderer Verkehrsteilnehmer nicht ausgeschlossen werden kann [16]. Die Sicherheitsüberprüfung sollte sich immer aus Tests jeder dieser drei zuvor genannten Methoden zusammensetzen.

3.4 Verfahrensablauf zur Genehmigung autonomer Fahrzeuge

Bis 2021 gab es auf europäischer Ebene keinen ausreichenden Rechtsrahmen für die Genehmigung autonomer Fahrzeuge. Es wurde auch bei Probefahrten autonomer Fahrzeuge immer eine Person, die das Steuer jederzeit übernehmen kann, vorausgesetzt. In Deutschland wurde daher mit dem Gesetz zur Änderung des Straßenverkehrsgesetzes (StVG) und des Pflicht-

versicherungsgesetzes – Gesetz zum autonomen Fahren vom 12.07.2021 ein nationaler Rechtsrahmen für die Einführung des Regelbetriebs für autonome Fahrzeuge geschaffen [53]. Diese Gesetzesänderung ermöglicht erstmals, dass Fahrzeuge ohne fahrzeugführende Personen betrieben werden dürfen. Die autonomen Fahrzeuge müssen sich beim Erreichen ihrer Systemgrenzen notfalls selbstständig in den sogenannten „risikominimalen Zustand“ versetzen können, also beispielsweise ihre Geschwindigkeit reduzieren und gegebenenfalls an einer sicheren Stelle anhalten. Außerdem muss immer auch über eine Leitstelle – die „Technische Aufsicht“ – ein externer Zugriff möglich sein. Die Technische Aufsicht darf allerdings nicht aus der Ferne das autonome Fahrzeug direkt ansteuern, sondern nur vorprogrammierte Fahrmanöver aktivieren, die anschließend vom Steuerungssystem des Fahrzeugs selbstständig überprüft und ausgeführt werden. Als weiterer neuer Begriff wurde im Straßenverkehrsgesetz der „festgelegte Betriebsbereich“ eingeführt. Der festgelegte Betriebsbereich definiert, in welchem Straßennetzbereich ein autonomes Fahrzeug betrieben werden darf.

Im Straßenverkehrsgesetz wird ein dreistufiger Genehmigungsprozess vorgegeben:

- Stufe 1: Betriebserlaubnis durch das Kraftfahrt-Bundesamt nach § 1e (1) Ziffer 2 StVG
- Stufe 2: Genehmigung des festgelegten Betriebsbereichs durch die gemäß Landesrecht zuständige Behörde nach § 1e (1) Ziffer 3 StVG
- Stufe 3: Zulassung zur Teilnahme am öffentlichen Straßenverkehr durch Zulassungsstellen nach § 1e (1) Ziffer 4 StVG

Das genaue Verfahren zu diesen drei Genehmigungsschritten wurde 2022 mit der Verordnung zur Genehmigung und zum Betrieb von Kraftfahrzeugen mit autonomer Fahrfunktion in festgelegten Betriebsbereichen (Autonome-Fahrzeuge-Genehmigungs- und-Betriebs-Verordnung – AFGBV) geregelt [57].

ÖPNV On-Demand

In dieser Verordnung ist außerdem detailliert festgelegt, welche Anforderungen an den Hersteller, den Halter und die Technische Aufsicht gestellt werden bzw. welche Pflichten auf diese zukommen.

Mit Organisationsschreiben vom 16.12.2021 wurde der Landesbaudirektion Bayern (LBD) die Aufgabe der Betriebsbereichsgenehmigung für das Straßennetz in Bayern ohne Autobahnen übertragen. Für die Bearbeitung dieser Aufgabe wurde in der Abteilung 7 – Zentrale Landesaufgaben Straße und Verkehr eine Projektgruppe „Autonomes Fahren – Betriebsbereichsgenehmigung“ eingerichtet. Sie ist fachaufsichtlich dem Bayerisches Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr – Referat 44 zugeordnet. Die Aufgabe der Projektgruppe besteht darin, einen Verfahrensablauf für den Genehmigungsprozess in Bayern zu entwickeln. Dazu müssen technische und rechtliche Randbedingungen für das Antragsverfahren sowie der Verwaltungsvollzug erarbeitet werden. Offene Rechtsfragen sind in Abstimmung mit dem BMDV, dem Kraftfahrt-Bundesamt und dem StMB zu klären.

Sobald der genaue Verfahrensablauf in Bayern feststeht, wird die Hauptaufgabe der Projektgruppe darin bestehen, Anträge zur Genehmigung eines Betriebsbereichs zu prüfen und zu genehmigen. Dies umfasst auch die Beteiligung der durch den Betrieb autonomer Fahrzeuge betroffenen Gebietskörperschaften und weiterer Träger öffentlicher Belange.

Insbesondere muss überprüft werden, ob die vom Kraftfahrt-Bundesamt bestätigte Betriebsdomäne des autonomen Fahrzeugs (ODD) ein sicheres Befahren im festgelegten Betriebsbereich ermöglicht und ob der Halter bzw. die Technische Aufsicht die Anforderungen hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit erfüllen.

Es zeichnet sich ab, dass in Deutschland drei verschiedene Konzepte für das autonome Fahren in nächster Zeit zur Genehmigung vorgelegt werden könnten.

Die flexible Personenbeförderung auf Anfrage – On-Demand-Mobilität genannt – sorgt für einen bedarfsorientierten ÖPNV und dient als Lückenschluss zwischen dem Haltepunkt des Linienverkehrs und dem Zielort. Das deutschlandweit größte Angebot in der On-Demand-Mobilität bieten der Rhein-Main-Verkehrsverbund (RMV) und die Deutsche Bahn (DB) gemeinsam mit lokalen Partnern in der Region Rhein-Main an. Nach Ansicht von RMV kann ein großflächiges Angebot von On-Demand-Verkehren nur mit autonom betriebenen Bussen wirtschaftlich realisiert werden [56]. Da die Fahrtrouten der On-Demand-Fahrzeuge wenige klar definierte Strecken umfassen, erscheint die Überprüfung des festgelegten Betriebsbereichs hier bewältigbar.

Hub-to-Hub Güterverkehr

In Deutschland fehlen heute schon mindestens 60.000 Berufskraftfahrer. Eine Lösung dieser Personalknappheit könnte künftig der Einsatz fahrerloser Lkw darstellen [59]. Experten gehen davon aus, dass in wenigen Jahren ein vollautomatisierter LKW-Pendelverkehr zwischen Logistikzentren möglich sein wird. Dieses auch Hub-to-Hub-Güterverkehr genannte Konzept wird derzeit im Projekt ATLAS-L4 mit autonomen LKW der Firma MAN Truck & Bus getestet. Eine Serienproduktion von selbstfahrenden Lkw strebt der Hersteller Daimler Truck bis Ende der 2020er Jahre an. Auch andere Lkw-Hersteller wie Scania oder Volvo experimentieren mit autonomen Trucks, teilweise auch mit elektrischem Antrieb. Experten rechnen aber damit, dass die Entwicklung autonomer Steuerungssysteme für Lkw länger dauern wird als für Pkw [1].

Umfangreiche Sammlungen relevanter Autobahnszenarien liegen für autonome Pkw bereits vor. Szenarien mit Lkw können aus den Daten der Probefahrten generiert werden. Beim Hub-to-Hub-Güterverkehr dürfte der Betriebsbereich zwischen bestimmten Anschlussstellen einer Autobahn klar umrissen sein. Damit erscheint eine Betriebsbereichsprüfung relativ einfach.

Robotaxis

Auf der IAA Mobility 2021 kündigten Intel und Sixt an, gemeinsam einen Taxi-Dienst mit autonomen Fahrzeugen in München anzubieten. Zu diesem Zweck wird Mobileye ein Serienfahrzeug mit entsprechender Hard- und Software ausstatten. Mobileye nimmt weltweit eine Führungsrolle ein in der Entwicklung von Kamerasensorik, maschinellem Lernen, Datenanalyse, Lokalisierung und Kartierung für das hochautomatisierte Fahren. Sixt wird sich als Fahrzeughalter um Bereitstellung, Wartung und Betrieb der Flotte kümmern [36, 51].

Der Betriebsbereich soll voraussichtlich das Stadtgebiet von München und den Bereich nördlich von München bis zum Flughafen umfassen. Die zulässige Betriebsdomäne (ODD) des autonomen Taxis muss somit ein sicheres Befahren von Autobahnen, Landstraßen und innerörtlichen Straßen auf einem relativ großen Straßennetz sicher beherrschen. Die Überprüfung dieses komplexen und großräumigen Betriebsbereichs wird sicherlich eine große Herausforderung darstellen.

3.6. Ausblick

Die Mitglieder der Projektgruppe Autonomes Fahren – Betriebsbereichsgenehmigung können in ihrer Tätigkeit auf die gebündelte Fachkompetenz in den Zentralstellen zurückgreifen.

Die umfangreiche Unfalldatenbank der Zentralstelle für Verkehrssicherheit (ZVS) kann wertvolle Dienste leisten, um die Unfallsituation in einem für das autonome Fahren festgelegten Betriebsbereich genau zu analysieren und gegebenenfalls daraus weitere Prüf-Szenarien zu entwickeln. Als Ausbildungsstelle für das Sicherheitsaudit liegen in der ZVS Erfahrungen in der Auditierung von Bestandsstrecken vor.

Über das Arbeitsstellenintegrationssystem (Arbis) kann die Zentralstelle Verkehrsmanagement (ZVM) den Betreibern autonomer Fahrdienste darlegen, wie Daten von Arbeitsstellen übermittelt werden. Die ZVM kann auch ihr umfangreiches Wissen zur Entwicklung kooperativer Systeme mit c2x-Kommunikation als Baustein für das automatisierte und vernetzte Fahren einbringen. Geografische Informationssysteme spielen eine wichtige Rolle bei der detaillierten Abbildung

eines festgelegten Betriebsbereichs. Die Zentralstelle Straßeninformationssysteme (ZIS) kann mit ihrem Expertenwissen für einen koordinierten Ablauf des Genehmigungsverfahrens und der anschließenden Begleitung des Betriebsablaufs beitragen.

Die eingangs skizzierte Entwicklungsgeschichte der autonomen Mobilität ist noch lange nicht abgeschlossen. Wir werden in den nächsten Jahren sicherlich noch viele Entwicklungsschritte hin zu noch besseren autonomen Fahrzeugen beobachten können. Dabei darf aber die Regel Nummer 2 der Ethik-Kommission in ihrem Bericht von 2017 [8] niemals außer Acht gelassen werden:

„Der Schutz von Menschen hat Vorrang vor allen anderen Nützlichkeitsabwägungen. Ziel ist die Verringerung von Schäden bis hin zur vollständigen Vermeidung. Die Zulassung von automatisierten Systemen ist nur vertretbar, wenn sie im Vergleich zu menschlichen Fahrleistungen zumindest eine Verminderung von Schäden im Sinne einer positiven Risikobilanz verspricht.“

Unfallentwicklung im Überblick

Gegenstand von Unfalluntersuchungen sind grundsätzlich alle polizeilich im Rahmen der Verkehrsunfallaufnahme registrierten Unfälle. Bei Unfalluntersuchungen ist die Unfallschwere ein besonders wichtiges Unterscheidungsmerkmal. Entsprechend der schwersten Unfallfolge lassen sich die Unfälle in vier Unfallkategorien einteilen. Die Unfallkategorie (Unfall mit Getöteten, Schwerverletzten, Leichtverletzten oder Unfall mit Sachschaden) folgt aus dem größten Schaden, den mindestens ein am Unfall Beteiligter erlitten hat. Im Anhang zu diesem Jahresheft ist beschrieben, wie die einzelnen Unfallkategorien gemäß dem Gesetz über die Statistik der Straßenverkehrsunfälle voneinander abgegrenzt werden.

Für 2022 ist festzustellen, dass die Verkehrsunfälle im klassifizierten Straßennetz in Bayern im Vergleich zum noch durch die Corona-Pandemie beeinflussten Vorjahr erneut zugenommen haben. Wie aus » Tab. 3 ersichtlich, ist gegenüber dem Vorjahr sowohl die Zahl der Unfälle mit Personenschaden (+6,2 %), die Zahl der kategorisierten Unfälle mit Sachschaden (+1,4 %), als auch die Anzahl an Verletzten (+6,3 %) gestiegen. Dabei nahm die Anzahl der Schwerverletzten um 2,0 Prozent ab, die der Leichtverletzten um 8,2 Prozent erheblich zu. Insbesondere die Anzahl der Getöteten nahm sehr deutlich um 13,1 Prozent zu. In absoluten Zahlen heißt dies, dass 2022 auf den klassifizierten Straßen in Bayern 389 Personen bei Verkehrsunfällen starben und 33.910 Personen verletzt wurden.

» Tab. 3
Kategorisierte Unfälle,
Unfallfolgen und
Veränderungen auf
klassifizierten Straßen
2021/2022 in Bayern

	2021	2022	21/22 %
Unfälle mit Personenschaden oder kategorisierte Unfälle mit Sachschaden U(P+S)	53.281	55.162	+ 3,5
davon Personenschadensunfälle U(P)	23.257	24.704	+ 6,2
davon Unfälle mit Sachschaden U(S)	30.024	30.458	+1,4
Getötete T	344	389	+13,1
Verletzte SV + LV	31.893	33.910	+6,3
davon Schwerverletzte SV	5.795	5.677	- 2,0
davon Leichtverletzte LV	26.098	28.233	+8,2
Unfälle mit Personenschaden U(P)	23.257	24.704	+ 6,2
davon außerorts	14.555	15.048	+3,4
davon innerorts	8.702	9.656	+11,0

Die Zahl der kategorisierten Verkehrsunfälle auf Gemeindestraßen in Bayern – die nicht Inhalt dieses Jahresheftes sind – hat gegenüber dem Vorjahr ebenfalls erheblich zugenommen. Im Jahr 2022 ereigneten sich hier 90.577 Unfälle mit Personen- oder Sach-

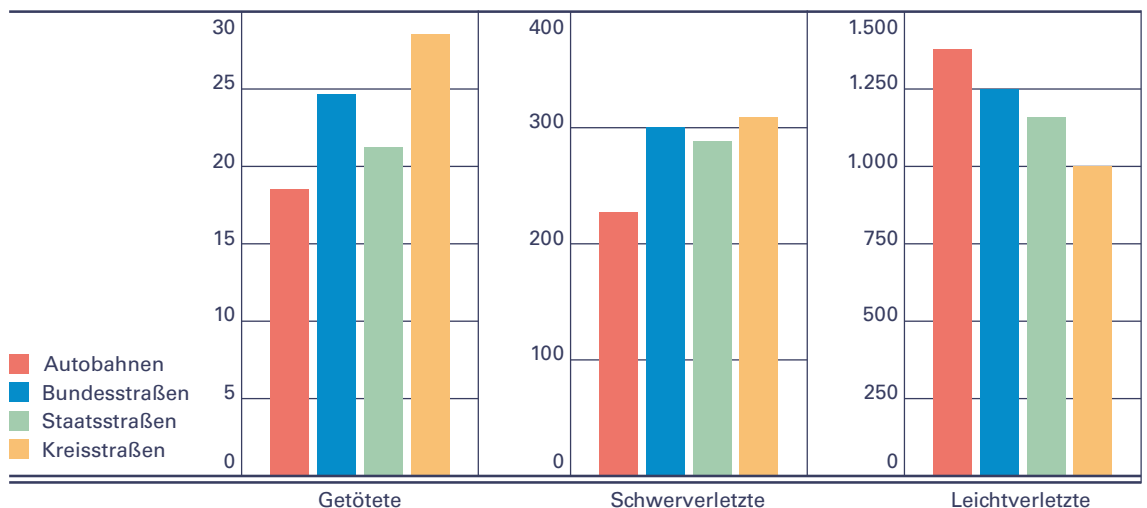
schaden, im Jahr 2021 waren es 82.727 Unfälle (+9,5 %). Die Zahl der Getöteten nahm im gleichen Zeitraum von 99 auf 130 Getötete (+ 31,3 %) massiv zu. Die Zahl der Verletzten stieg ebenso an, um 3.091 auf 27.881 Verletzte (+12,5 %).

Die mittlere Unfallschwere eines Unfallkollektivs lässt sich anhand des Verhältnisses von Unfallfolgen, z.B. der Anzahl an Verunglückten, zur Gesamtzahl an Unfällen dieses Kollektivs beschreiben. » Abb. 35 zeigt dies für die Anzahl der Getöteten, Schwer- bzw. Leichtverletzten pro 1.000 Unfällen mit Personenschaden des Jahres 2022 auf den klassifizierten Außerortsstraßen in Bayern. Demzufolge ist im Vergleich der Straßenklassen die Wahrscheinlichkeit, dass Verkehrsteilnehmende bei einem Personenschadensunfall getötet werden, auf Kreisstraßen am höchsten. Darüber hinaus können auch Unfallkosten, welche die volkswirtschaftlichen Folgen von Verkehrsunfällen beziffern, die Schwere von Unfällen abbilden. Alles in allem verur-

sachten die Unfälle auf klassifizierten Straßen in Bayern im Jahr 2022 volkswirtschaftliche Folgekosten in Höhe von rund 2,4 Mrd. Euro, davon mit 71 Prozent den weitaus größeren Anteil außerorts.

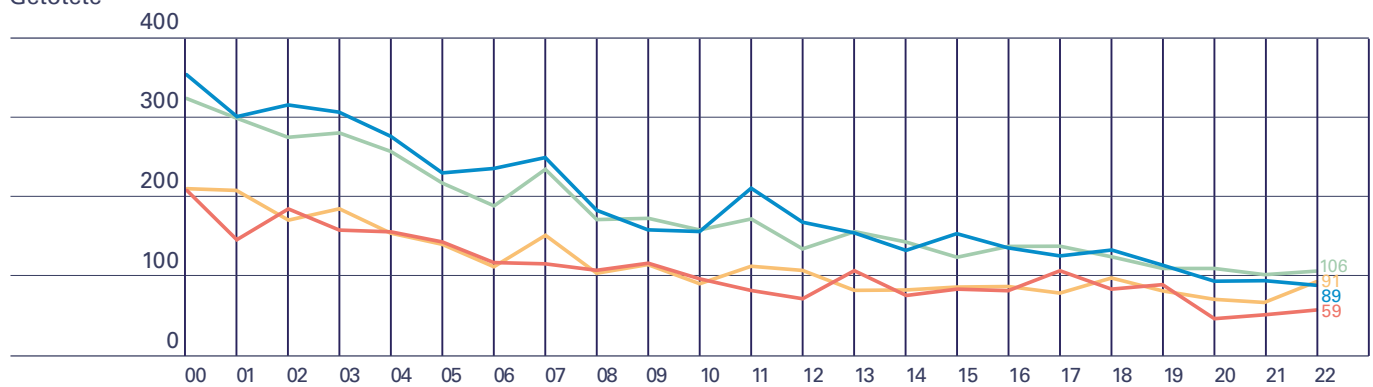
Einjährige Unfallauswertungen erlauben nur die Beurteilung der aktuellen Situation. Aufgrund des Einflusses der Zufälligkeit ermöglicht selbst ein Vergleich von absoluten Unfallzahlen und -folgen zweier aufeinanderfolgender Jahre keine langfristigen Aussagen. Deshalb sind für gesicherte Vergleichswerte über die langfristige Entwicklung des Unfallgeschehens stets größere Zeiträume zu betrachten.

» Abb. 35
Unfallschwere:
Verunglückte je
1.000 Unfälle mit
Personenschaden
2022 nach Straßen-
klasse außerorts in
Bayern

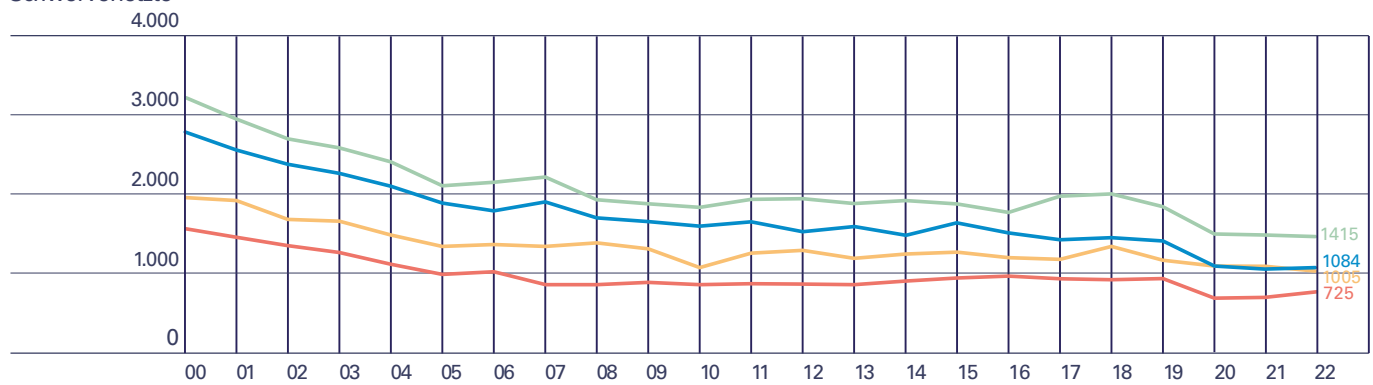


» Abb. 36
 Unfallfolgen nach
 Straßenklasse 2000 -
 2022 außerorts in Bayern

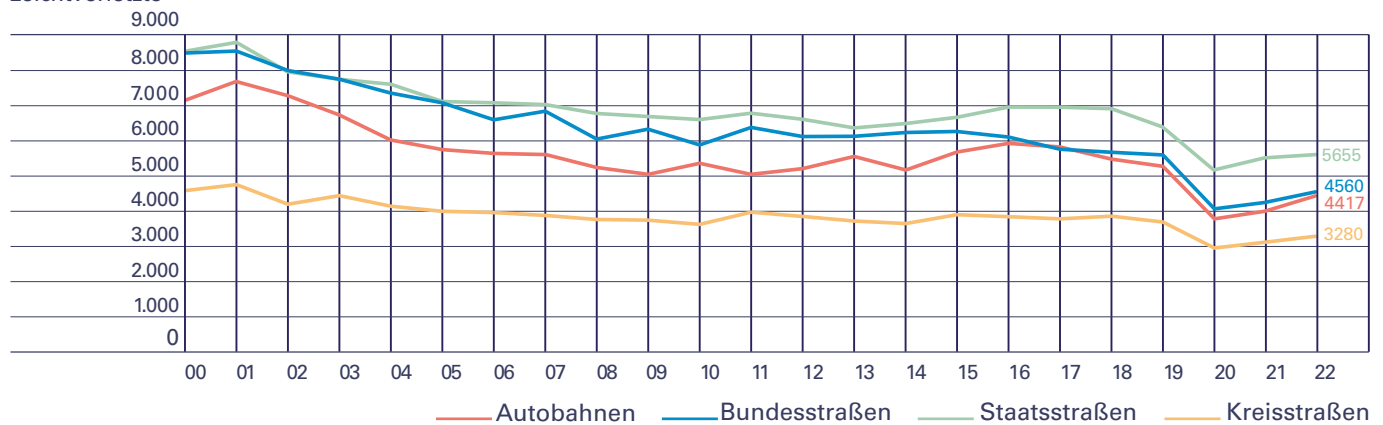
Getötete



Schwerverletzte



Leichtverletzte



Die Entwicklung der Unfallfolgen auf den klassifizierten Außerortsstraßen von 2000 bis 2022 in Bayern » [Abb. 36](#) zeigt einen deutlichen Rückgang bei den Getöteten in der ersten Dekade. In diesem Zeitraum konnte die Zahl der Getöteten mehr als halbiert werden - unabhängig von der Straßenklasse. Seit 2010 fällt der Rückgang bei den Getöteten verglichen mit den Vorjahren geringer aus. Bei der Zahl der im Straßenverkehr schwerverletzten Personen ist von 2000 bis 2010 ebenso eine beachtliche Abnahme festzustellen.

Im Vergleich zu den Getöteten ist sie mit 44 Prozent allerdings etwas geringer ausgeprägt. Auch bei den Schwerverletzten kann ab 2010 eine Trendänderung beobachtet werden. Die Zahl der Schwerverletzten veränderte sich über mehrere Jahre hinweg kaum. Ähnlich wie für Schwerverletzte sieht die Entwicklung der Leichtverletzten aus - mit dem Unterschied, dass der Rückgang der Leichtverletzten zwischen 2000 und 2010 mit rund 25 Prozent merklich moderater ausgefallen ist. Über alle Straßenkategorien sind die Auswirkungen der Corona-Pandemie in Form von deutlichen Unfallrückgängen - bezogen auf die Jahre 2020 mit 2022 verglichen mit den recht stabilen Unfallzahlen der Dekade zuvor - zu beobachten.

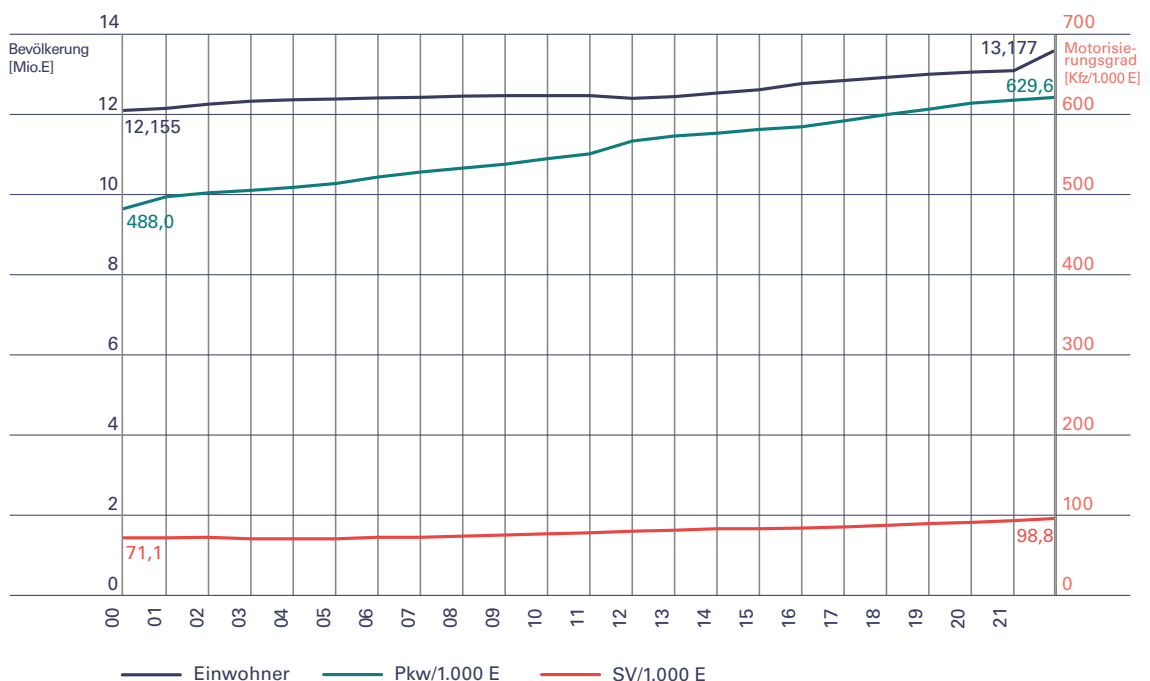
Die langfristigen Tendenzen werden von kurzzeitigen, unregelmäßigen Zu- und Abnahmen überlagert. Ursachen für kurzzeitige wie auch langfristige Trendabweichungen können witterungsbedingte Einflüsse, Veränderungen im Fahrzeugbestand, der jährlichen Fahrleistung, im Verkehrsrecht, im Sozialverhalten, im Rettungs- und Ausbildungswesen, die Einführung von neuen Sicherheits- und Überwachungstechniken aber genauso Innovationen im Straßenbau und -betrieb oder Umwidmungen sein.

Bezugsgrößen des Unfallgeschehens

Verkehrsunfälle sind ohne Verkehrsgeschehen nicht möglich. Das Verkehrsaufkommen auf Bayerns Straßen wird wiederum maßgeblich beeinflusst von der Zahl der Einwohner und dem Bestand an Kraftfahrzeugen in Bayern. Das Verhältnis zwischen der Anzahl aller Kraftfahrzeuge und Einwohnerzahl wird als Motorisierungsgrad bezeichnet. Dieser beschreibt die Verfügbarkeit von Kraftfahrzeugen. Die nachstehende » Abb. 37 zeigt die Entwicklung der Einwohnerzahl und des Motorisierungsgrades in Bayern seit 2000. Die betrachteten Größen zeigen in dieser Zeitspanne einen jeweils moderaten Anstieg. Die

Einwohnerzahl ist insgesamt um 8,4 Prozent angewachsen: Beim Kfz-Bestand hingegen ist ein deutlich größerer Zuwachs von insgesamt 45 Prozent zu registrieren. Somit kamen im Jahr 2000 auf 1.000 Einwohner Bayerns insgesamt 559,1 Pkw oder Schwerverkehrsfahrzeuge (Lkw, Zugmaschinen, Busse), im Jahr 2022 waren es 728,4. Der Motorisierungsgrad für Fahrzeuge des Schwerverkehrs weist eine sehr ähnliche Entwicklung auf. Der Anteil von Schwerverkehrsfahrzeugen am gesamten Kfz-Bestand hat sich von 2000 nach 2022 kaum verändert (von 11,71 % auf 12,16 %).

» Abb. 37
Entwicklung der Einwohnerzahl und des Motorisierungsgrades 2000-2022 in Bayern



Um das Unfallgeschehen gesamter Regionen miteinander vergleichen zu können, kann dieses auf die Einwohnerzahlen oder den zugehörigen Kfz-Bestand bezogen werden. Für den Vergleich von Straßen bzw. ganzer Straßennetze liefert

eine Relativierung der Unfalldaten mit den jeweiligen Längen der untersuchten Straßen(netze) oder der darauf abgewickelten Fahrleistung wesentlich bessere Ergebnisse.

Die Netzlängen der außerörtlichen Bundes-, Staats- und Kreisstraßen in Bayern weisen seit Jahren nur geringe Veränderungen auf. So hat sich das Netz der klassifizierten Landstraßen seit dem Jahr 2000 nur sehr geringfügig um 0,41 % (132,5 km) vergrößert. Demgegenüber steht im gleichen Zeitraum ein Zuwachs des Autobahnnetzes von 13,7%, was 306,8 Kilometern entspricht.

Die Verkehrsmenge, auch Verkehrsstärke genannt, gibt den Durchsatz an Kraftfahrzeugen pro Zeiteinheit, im Regelfall ein Kalenderjahr, wieder. Die durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke (DTV) wird zur Beurteilung von Sicherheit, Qualität und Leistungsfähigkeit des Verkehrsablaufs herangezogen. Bei der Beurteilung der Verkehrsstärken seit der Jahrtausendwende ist zu beachten, dass den DTV-Werten der Jahre 2000, 2005, 2010, 2015 und 2021 die Ergebnisse der amtlichen Straßenverkehrszählung zugrunde liegen, die Werte der übrigen Jahre wurden auf Basis der Zählergebnisse der automatischen Dauerzählstellen in Bayern hochgerechnet [5]. Zuletzt wurden hierfür auch Daten von Seitenradargeräten verwendet.

Die Jahresfahrleistung gibt an, wie viele Kilometer die Kraftfahrzeuge innerhalb eines Jahres auf einem bestimmten Netzabschnitt bzw. gesamten Straßennetz fortbewegt wurden. Sie errechnet sich als Produkt aus Straßenlänge und zugehörigem DTV-Wert (siehe Anhang). Die Gesamtfahrleistung bayerischer Autobahnen entspricht etwa der gesamten Fahrleistung aller klassifizierten Landstraßen in Bayern (Bundes-, Staats- und Kreisstraßen zusammengenommen). Für den Schwerverkehr hingegen zeigt sich eine solche Gleichverteilung nicht. Denn auf Autobahnen wird rund doppelt so viel Schwerverkehr abgewickelt wie auf den klassifizierten Landstraßen [5].

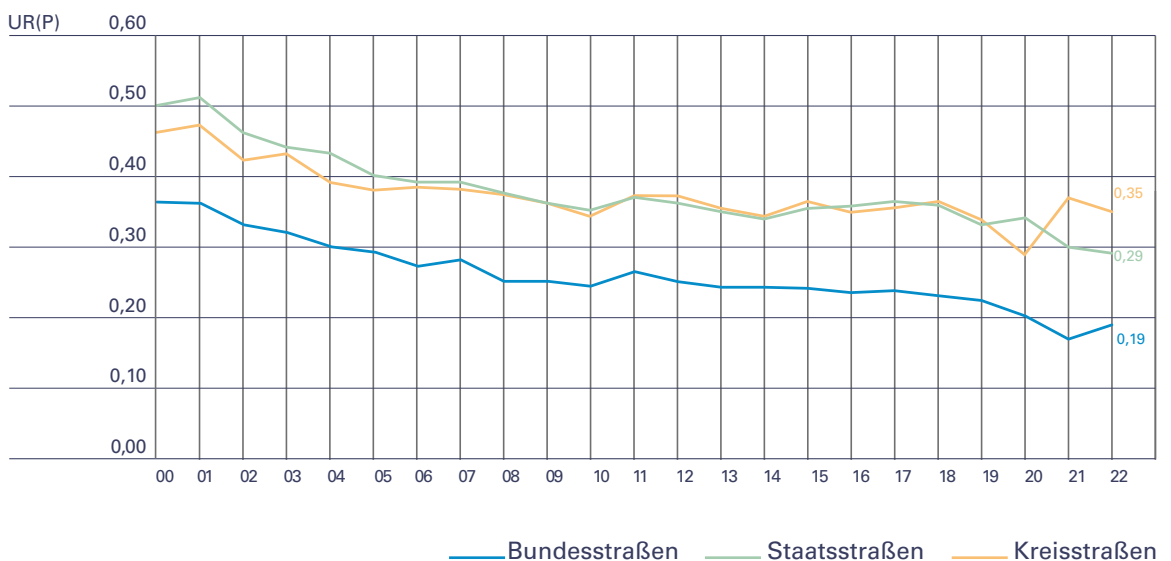
Unfallkenngrößen

Absolute Unfalldaten sind meist wenig hilfreich, um die Verkehrssicherheit einzelner Straßen- gruppen objektiv miteinander vergleichen zu können. Zu diesem Zweck werden die Absolut- größen des Unfallgeschehens mittels Bezugs- größen relativiert und daraus Unfallkenngrößen gebildet.

Die Häufigkeit, der während eines bestimmten Zeitraumes (in der Regel ein Jahr) auf bestimm- ten Streckenabschnitten geschehenen Verkehrs- unfälle, wird in der Unfalldichte ausgedrückt. Die Unfalldichte spiegelt die Verteilung der

Unfälle im Straßennetz wider. Dabei bleibt die Verkehrsbelastung auf dem zu untersuchenden bzw. zu vergleichenden Streckenabschnitt un- berücksichtigt. Aus diesem Grund darf bei einer derartigen Betrachtung eine hoch belastete autobahnähnliche Bundesstraße nicht gleichge- setzt werden mit beispielsweise einer schwach belasteten Kreisstraße.

» Abb. 38
Unfallrate für Unfälle mit Personenschaden UR(P) nach Straßen- klasse 2000 - 2022 außerorts in Bayern



Grundsätzlich wird das Unfallrisiko von der Verkehrsbelastung beeinflusst. Wenn kein Verkehr stattfindet, kann sich kein Verkehrs- unfall ereignen – wenn viel Verkehr statt- findet, sind im Allgemeinen mehr Unfälle zu beobachten. Dieser Einfluss wird in der Unfallrate mittels der Bezugsgröße Fahrlei- stung ausgedrückt.

Die Unfallrate ist daher ein Maß für das fahrleistungsbezogene Risiko des Eintritts eines Unfalls. Die in » Abb. 38 dargestellten Unfallraten für Unfälle mit Personenschaden UR(P) geben an, wie viele Unfälle mit Perso- nenschaden sich im Mittel in einem Kalender- jahr bei einer Fahrleistung von einer Million Kraftfahrzeugkilometer ereigneten.

Zwischen 2000 und 2010 hat sich die Unfallrate und damit die Wahrscheinlichkeit, bei einem Unfall getötet oder verletzt zu werden, auf den klassifizierten Straßen außerhalb geschlossener Ortschaft um rund ein Drittel verringert. In den letzten Jahren zeigt sich allerdings insgesamt eine Tendenz zu Unfallraten für Unfälle mit Personenschaden auf konstantem Niveau. Die für die Jahre 2020 und 2022 berechneten Unfallraten können Verzerrungen aufgrund der Folgen der Corona-Pandemie unterliegen.

Aus der Darstellung der Kenngröße Unfallrate lässt sich ableiten, dass das Risiko, bei gleicher Fahrleistung an einem Unfall mit Personenschaden beteiligt zu sein, vom Ausbaustandard der Straße abhängt. Die außerörtlichen Bundesstraßen schneiden in Bezug auf die Unfallrate deutlich besser ab als die Staats- sowie Kreisstraßen außerorts. Hier kommt zum Tragen, dass Bundesstraßen im Mittel u.a. breiter sind, ausgewogener trassiert sind und besseren passiven Schutz aufweisen.

Anhang

www.lbd.bayern.de

