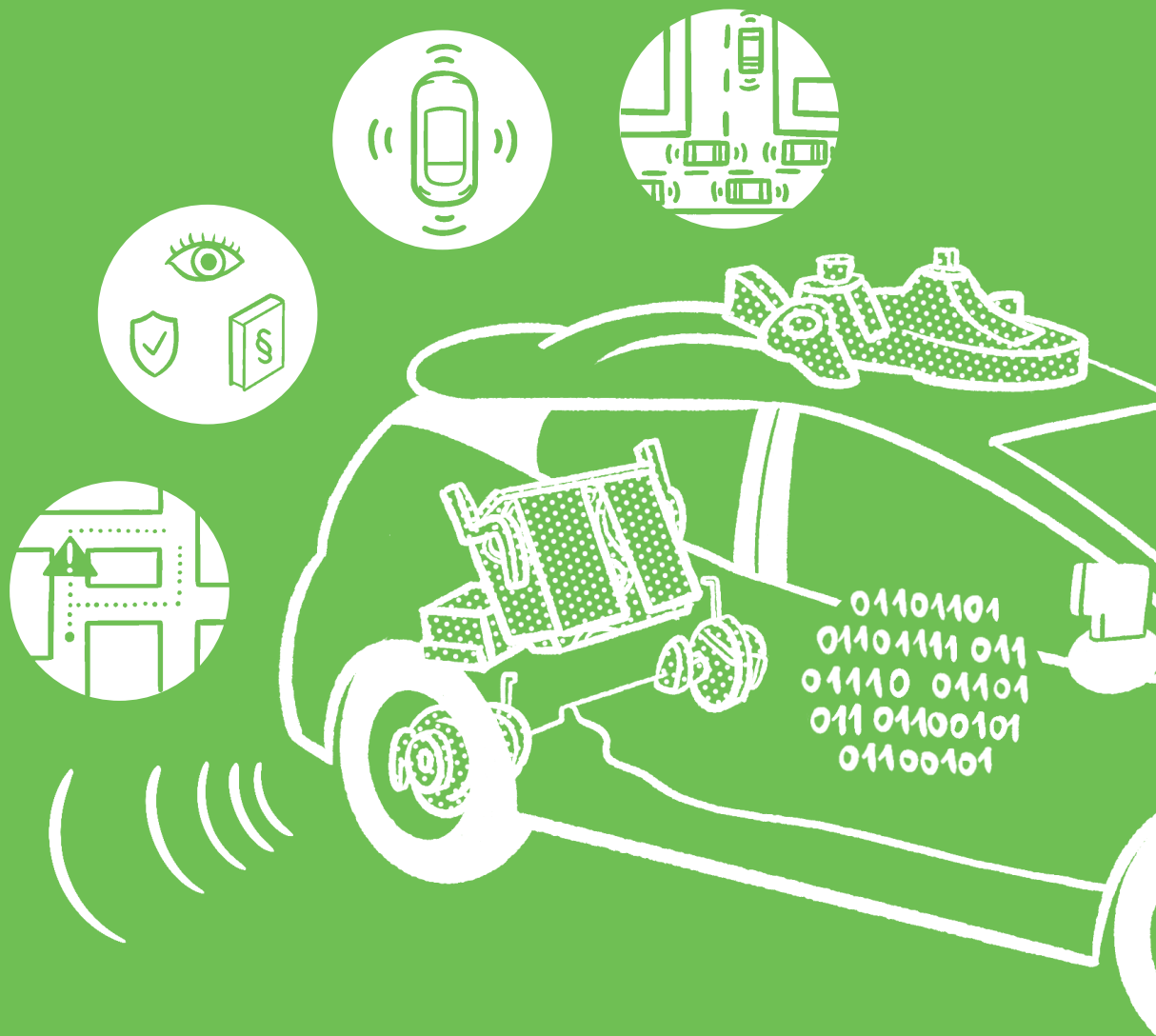


Autonomes Fahren

Ein Treiber zukünftiger Mobilität



Vorwort

Bereits 1939 entwickelte der Künstler Norman Ben Geddes die Vision einer Stadt, die von selbstfahrenden Autos befahren wird. In seiner Arbeit für die Weltausstellung im Auftrag von *General Motors* träumte er davon, dass sich eine solche Stadt bis ins Jahr 1960 realisiert haben würde. Bis dann, so seine Konzeptskizze, sollte das Gros der Autos autonom fahren. Der Futurologe Ray Kurzweil schwärmte 60 Jahre nach Norman Ben Geddes, dass bis ins Jahr 2009 die Mehrheit der Autos autonom fahren würden. Die Visionen Geddes' und Kurzweils haben sich auch im Jahr 2022 noch nicht realisiert. Dennoch wird allmählich deutlich, wie der Weg zum selbstfahrenden Auto und zum Mobilitätssystem der Zukunft aussehen könnte.

Die Beschäftigung der SATW mit dem Thema «Autonome Mobilität» begann im Februar 2018 mit der Gründung der gleichnamigen Themenplattform. Zu dieser Zeit erlebte das Thema, angestoßen durch die zunehmende Digitalisierung und die Fortschritte im Bereich der künstlichen Intelligenz, diskursiven Aufschwung. Getrieben von Versprechen der Marketingabteilungen, war die Tonalität des Diskurses noch etwas optimistischer, und es schien, als stünden selbstfahrende Autos kurz vor der Einführung. Vier Jahre – und unzählige

Arbeitsstunden von Ingenieur:innen und Wissenschaftler:innen verschiedener Disziplinen und Arbeitsfelder – später sind die Erwartungen nicht mehr ganz so hoch.

In den Jahren seit der Gründung der Themenplattform unter der Leitung von Prof. Dr. Wolfgang Kröger hat die SATW drei Workshops mit nationalen und internationalen Gästen zu verschiedenen Aspekten dieser breiten Thematik organisiert. Zweimal standen Risiko- und Sicherheitsaspekte im Vordergrund, einmal das etwas breitere Themenfeld Mobilitätskonzepte.

Unter Expertinnen und Experten gelten automatisierte Fahrzeuge als Krönung der Digitalisierung, dies insbesondere aufgrund ihrer technischen Komplexität. Autonome Fahrzeuge interessieren die Öffentlichkeit aber nicht nur deswegen, sondern auch weil Mobilität eine grundlegende Bedeutung für die moderne Gesellschaft hat und damit jede:n betrifft. Automatisierte Fahrzeuge werden so zum Knotenpunkt, an dem auch weitere und grundlegendere Fragen zur Zukunft der Mobilität verhandelt werden, dazu zählen mithin technische, juristische, politische und gesellschaftliche Fragen.

Diese Publikation schafft eine Verbindung zwischen allgemeinem Überblick mit Antworten auf die wichtigsten Fragen zu automatisierten Fahrzeugen und vertiefenden Einzelbeiträgen.

Die Autor:innen der Einzelbeiträge greifen zentrale Aspekte auf und behandeln diese aus ihrer jeweiligen Fachdisziplin. Die ersten vier Beiträge fokussieren das Thema Simulation, Testen und eine mögliche Gestaltung der Sensorik. Der darauffolgende Text gibt den gegenwärtigen Stand der europäischen Diskussion um einen möglichen Zertifizierungsprozess wieder, bevor dann ethische Aspekte verhandelt werden. Zwei weitere Beiträge skizzieren zukünftige Mobilitätskonzepte, bevor zum Abschluss dargelegt wird, wie ein Handlungsrahmen aussehen könnte und wo die gegenwärtigen Bedenken in Bezug auf Mischverkehr liegen.

Vorwort	3
Executive Summary	5
Aufriss – Antworten auf oft gestellte Fragen	6
Das heutige Verkehrssystem	6
Automatisiertes Fahren	8
Innovationen bei automatisierten Fahrzeugen	14
Sicherheit autonomer Fahrzeuge	18
Zukunft der Mobilität: Konzepte	24
Referenzen	27
Vertiefende Einzelbeiträge	29
Simulation-Enabled Methods for the Development, Testing and Validation of Cooperative and Automated Vehicles	30
Simulation of Abstract Scenarios: Towards Automated Tooling in Criticality Analysis	42
Autonomous driving safety validation: A method to overcome parameter space explosion using Importance Analysis, Surrogate modeling, and informed sampling	52
Sensing and Perception in Automated Driving	64
From development to road approval and organized experience feedback in Europe	72
Verantwortliche Gestaltung des autonomen Fahrens. Ethische Aspekte und ihre Relevanz	78
Vision zukünftiger, digitalisierter und vernetzter Mobilitätskonzepte I	86
Vision zukünftiger, digitalisierter und vernetzter Mobilitätskonzepte II	93
Effects of automated driving – A framework for action	98
Automated driving in Switzerland – safety challenges of mixed traffic	107

Executive Summary

Hochautomatisierte Fahrsysteme versprechen, dass die Verkehrssicherheit gesteigert werden kann. Das ist angesichts der hohen und noch weiter ansteigenden Sicherheit der von Menschen gefahrenen Autos eine echte Herausforderung.

Die Entwicklung schreitet fort, wenngleich in jüngster Zeit die Erwartungen an ein schnelles Erreichen der Ziele einen Dämpfer erfahren haben. Der verlässliche Nachweis erforderlicher funktionseller und operationeller Sicherheit könnte sich als Flaschenhals erweisen. Das gilt insbesondere für die Cybersicherheit, da die Vielzahl fahrzeuginterner und -externer Schnittstellen und drahtloser Kommunikationskanäle potenzielle Schwachstellen für Attacken bilden.

Die verbliebenen, erheblichen technischen Probleme gelten zwar als lösbar, doch die grundsätzliche Akzeptanz der Technologie und ermöglichter innovativer Mobilitätskonzepte bereitet Sorgen und ist noch keinesfalls sicher.

Es zeichnet sich ein hochkomplexes System ab. Das gilt für die einzelnen hoch- bis vollautomatisierten und kooperativen Fahrzeuge, aber noch mehr für zukünftige Verkehrssituationen. Diese bleiben womöglich über einige Dekaden von Mischverkehr geprägt. Damit einhergehend werden die Interaktionen zwischen den Verkehrsteilnehmenden komplexer und neben Mensch-zu-Mensch-Interaktionen nehmen Mensch-Maschine-Interaktionen zu.

Hoch- und vollautomatisierte Fahrzeuge sowie zukünftige Verkehrskonzepte fordern unsere Bereitschaft heraus, Neuartiges und bisher Unübliches zu antizipieren, zu akzeptieren und schliesslich zu kaufen. Dazu zählen selbstlernende Systeme, die Informationen aus ihrer Umgebung nutzen, ja darauf angewiesen sind, um ihre Performance weiter zu verbessern und sich dauernd zu verändern. Upgrades und Patches, die das Verhalten von Fahrzeugen verbessern sollen, werden zum Alltag gehören.

Angesichts bestechender Vorteile werden autonome Fahrzeuge über kurz oder lang trotz aller Schwierigkeiten und Vorbehalte Realität werden, sich am Markt durchsetzen und eine führende Rolle bei Mobilitätskonzepten der Zukunft spielen.

Heutiges Verkehrssystem

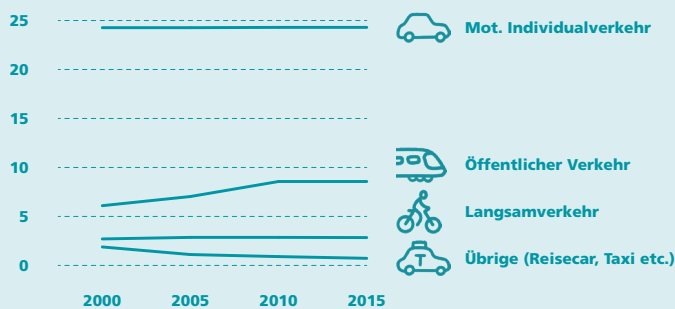
Was charakterisiert Mobilität heute?

Das heutige Mobilitätsverhalten der Schweizer Bevölkerung im Inland ist geprägt von drei Verkehrsträgergruppen: dem motorisierten Individualverkehr (Auto, Mofa, Motorrad), dem öffentlichen Verkehr (Bus, Tram, Zug) und dem Langsamverkehr (Elektrovelo, Fahrrad, Fussgänger:innen etc.). Alle drei tragen auf ihre eigene Weise zum Funktionieren des heutigen Personenverkehrssystems bei. Der Personenwagen bleibt das wichtigste Verkehrsmittel der Schweizer Bevölkerung. Aktuell sind in der Schweiz 4,7 Millionen Personenwagen zugelassen, dieser Bestand hat sich seit 1980 mehr als verdoppelt. Auch die mit dem Personenwagen zurückgelegten absoluten Distanzen haben zugenommen. Dennoch war der Anteil des motorisierten Individualverkehrs am Gesamtverkehr zwischen 1994 und 2015 rückläufig. Im Jahr 2015 wurden pro Person knapp doppelt so viele Kilometer mit dem Zug zurückge-

legt als noch im Jahr 1994. Diese Zunahme kann insbesondere auf den Ausbau der Eisenbahninfrastruktur und die damit einhergehende Angebotsvergrößerung zurückgeführt werden. Der Langsamverkehr macht lediglich einen kleinen Teil des gesamten Verkehrsvolumens aus, dennoch übernimmt er eine wichtige Scharnierfunktion zwischen den verschiedenen Verkehrsmitteln. Der wichtigste Verkehrszweck ist der Freizeitverkehr. Abbildung 1 zeigt die Entwicklung der Anteile der Verkehrsträger am Gesamtverkehr in Kilometern pro Person.

Im Güterverkehr wurden im Jahr 2019 allein in der Schweiz 27,2 Milliarden Tonnenkilometer absolviert, der Grossteil davon auf der Strasse. Seit dem Jahr 2000 haben die Transportleistungen um 16 Prozent zugenommen, mit einem Höchststand

Abbildung 1:
Veränderungen
der täglichen
Distanzen in
Kilometern pro
Person nach
Verkehrsmittel



im Jahr 2014, wobei die Zunahme vollständig auf die Strasse entfällt. Die per Eisenbahn absolvierten Transportleistungen waren leicht rückläufig. Im Güterverkehr unterscheiden sich die Verkehrsträger hinsichtlich der mittleren absolvierten Distanzen stark. Auf der Schiene wurden im Mittel 114 Kilometer je Transportleistung zurückgelegt, während es auf der Strasse lediglich 37 Kilometer waren.

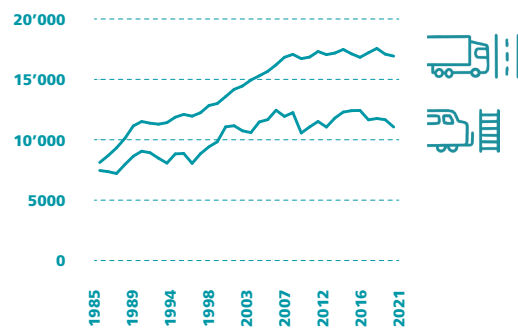


Abbildung 2: Entwicklung der Transportleistung in Millionen Tonnenkilometern (Schweiz)

→ Die Mobilität hat traditionell einen hohen Ressourcen- und Energieverbrauch. So verursacht das Verkehrssystem eine grosse Menge an Emissionen von Treibhausgasen und Luftschadstoffen. Im Jahr 2019 gingen 38 Prozent der in der Schweiz verbrauchten Endenergie auf das Konto des Verkehrs. Damit stellt der Verkehr die grösste Energieverbrauchergruppe dar, noch vor den Haushalten und der Industrie. Der Verkehr verursachte einen CO₂-Ausstoss von 14,8 Millionen Tonnen, das sind 40 Prozent der Schweizer CO₂-Emissionen. Das heutige Verkehrssystem beansprucht gut 2 Prozent der schweizerischen Landesfläche, dies entspricht beinahe einem Drittel der Siedlungsfläche. Der Grossteil der Verkehrsflächen, nämlich 88 Prozent, entfallen auf Strassen und Autobahnen.

Die Reduktion von Verkehrsunfällen ist ein wichtiges Anliegen von Gesellschaft und Politik. Die Sicherheit auf den Schweizer Strassen hat sich in den letzten Jahren trotz zunehmenden Verkehrsaufkommens ständig verbessert, dennoch wurden im Jahr 2019 17'761 schwere Verkehrsunfälle mit gesamthaft 187 Toten und 3464 Schwerverletzten registriert. 90–95 Prozent der Unfälle sind auf menschliches Fehlverhalten zurückzuführen (vgl. Deublein 2020). Statistiken anderer Länder, beispielsweise der USA, weisen ähnlich hohe Anteile aus. Als häufigste Ursachen gelten überhöhte Geschwindigkeit, Ablenkung, Missachtung anderer Verkehrsteilnehmenden, Müdigkeit und Alkohol am Steuer.

Welche Herausforderungen bestehen im heutigen Verkehrssystem?

Ausserdem wird das Verkehrssystem nicht effizient genutzt, und die Infrastruktur ist teilweise stark überlastet. Letzteres belegen unter anderem die jährlichen Stautunden: 25'366 Stunden im Jahr 2018, rund 11 Prozent mehr als noch im Jahr 2015. Das Verhalten der Verkehrsteilnehmenden sowie ihre tageszeitlichen Gewohnheiten erschweren eine optimale Nutzung der verfügbaren Kapazitäten. Autos stehen 96 Prozent der Zeit ungenutzt auf den Parkplätzen, sind teuer und sind im Pendlerverkehr mit durchschnittlich 1,1 Personen pro Fahrzeug schlecht ausgelastet. Obwohl der öffentliche Fernverkehr über den Tag gesehen durchschnittlich lediglich zu rund 30 Prozent ausgelastet ist, ist er zeitweise stark überlastet.

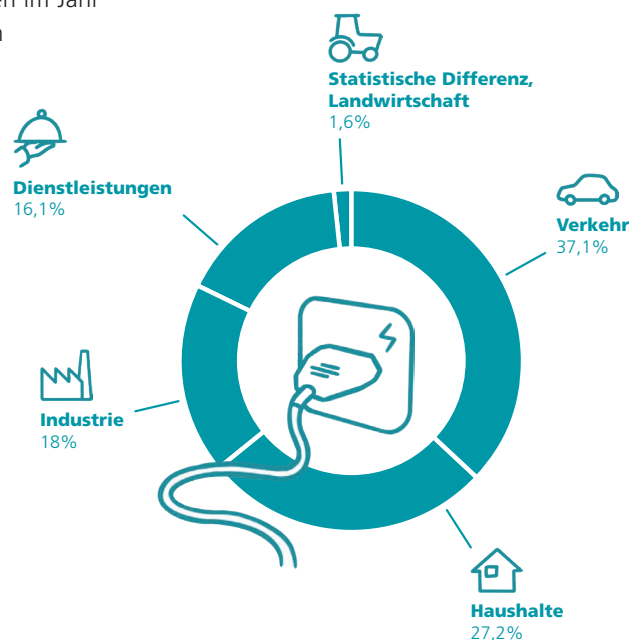


Abbildung 3: Energieverbrauch nach Verbrauchergruppen (2019)

Automatisiertes Fahren

Was sind automatisierte Fahrzeuge?

↓ Automatisiertes Fahren beschreibt nicht nur den Endzustand des vollautomatisierten Fahrzeugs, sondern auch die Entwicklung dahin. Um die Entwicklung von nicht-automatisierten Fahrzeugen hin zu vollständig selbstfahrenden Fahrzeugen fassbar zu machen, hat die amerikanische *Society of Automotive Engineers* (SAE) ein Stufenmodell entwickelt, das verschiedene Automatisierungsstufen unterscheidet. Diese Einteilung hat weltweit Schule gemacht und wird verwendet, um präziser zu bezeichnen, was jeweils unter automatisierten Fahrzeugen verstanden wird.

Ein zentrales Motiv hinter der Entwicklung automatisierter Fahrzeuge ist es, mehr Sicherheit, Umweltfreundlichkeit, Effizienz, bessere soziale Integration und mehr Komfort zu bieten, insbesondere durch den Einsatz digitaler Technologien (EC STRIA 2019). Bereits heute verfügen Autos über Assistenzsysteme, die einen Teil der Aufgaben übernehmen und die Lenkenden bei der Spurhaltung sowie bei der Abstands- oder Geschwindigkeitskontrolle unterstützen. Zukünftige Assistenzsysteme sollen die Personen hinter dem Steuer auch von der permanent notwendigen Wachsamkeit befreien und den Weg zur Vollautomatisierung bahnen.

① SAE-Stufe 0 bedeutet keine Automatisierung. Der Mensch hat die volle Kontrolle über das Fahrzeug und steuert es in jedem Moment selbst ohne Unterstützung durch Assistenzsysteme.

② Fahrzeuge der SAE-Stufe 1 sind mit einfachen Assistenzsystemen ausgestattet, etwa mit Tempomat, mit Antiblockier-Bremssystemen oder mit Funktionen zur Stabilitätskontrolle; solche Systeme sind bereits heute in vielen Fahrzeugen enthalten. Den Tempomaten, eine Anlage zum Halten der Geschwindigkeit, gibt es bereits seit den 60er-Jahren.

③ SAE-Stufe 2 beschreibt eine Teilautomatisierung. Diese beinhaltet meist fortgeschrittene Assistenzsysteme zur Notbremsung oder zur Kollisionsvermeidung. Das Fahrzeug wird dabei jederzeit vom Menschen kontrolliert, selbst wenn dieser wiederum von Systemen unterstützt wird. In aktuellen Fahrzeugen werden solche Assistenzsysteme schon seit geraumer Zeit eingesetzt und sollen für Neuwagen bald Pflicht werden.

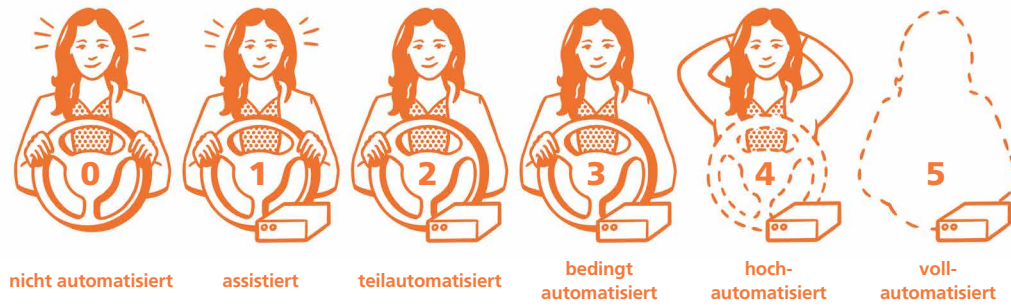


Abbildung 4: Automatisierungsstufen gemäss Definition der SAE

③ Fahrzeuge der SAE-Stufe 3 sind in der Lage, in spezifizierten Betriebsbereichen (etwa auf Autobahnen) und bei günstigen Wetterbedingungen die Fahraufgabe umfassend und dauerhaft zu übernehmen, ohne dass die Person hinter dem Steuer die Fahrt überwachen muss. Erreicht das System seine Grenzen, etwa weil es die spezifizierten Betriebsbereiche verlässt, sich die Wetterbedingungen ändern oder aufgrund anderer Vorkommnisse, muss der Mensch die Fahraufgabe sofort übernehmen, nachdem er vom Fahrzeug dazu aufgefordert wurde.

④ Fahrzeuge der SAE-Stufe 4 können in spezifizierten Bereichen unter restriktiven Betriebsbedingungen automatisiert fahren, wenn die entsprechende Infrastruktur (wie Fahrspurmarkierungen und detaillierte Karten) vorhanden ist. Sind diese Bedingungen nicht erfüllt, beendet das Fahrzeug die Fahrt, indem es automatisch abbremst und einparkt oder sich in einen anderen Zustand minimalen Risikos bringt. Solche Fahrzeuge werden als hochautomatisiert bezeichnet.

⑤ Vollautomatisierte Fahrzeuge der SAE-Stufe 5 sind in der Lage, selbständig zu fahren – unabhängig von Strassenbeschaffenheit, Situation und Wetter. Lenkrad und Pedale werden, gemäss heutigen Designstudien, nicht einmal mehr angeboten.

Die wirklichen Herausforderungen in der Entwicklung von Hard- und Software für das automatisierte Fahren betreffen die SAE-Stufen 3 bis 5. Weite Teile der Industrie verfolgen eine schrittweise Erhöhung des Automatisierungsgrades.

Fahrzeuge der SAE-Stufe 3 lassen der Person hinter dem Steuer die Möglichkeit, sich während des normalen Betriebs auf andere Aktivitäten als auf das Fahren zu konzentrieren, aber es wird erwartet, dass die verantwortliche Person bei Alarm die Kontrolle übernimmt. Welche Anforderungen an die Lenkenden bei Fahrzeugen der SAE-Stufe 3

genau zu stellen sind und wie die geforderte Reaktionszeit erreicht werden kann, ist derzeit noch unklar. Das zuverlässige Übernehmen der Fahraufgaben durch einen Menschen ist denn auch eines der zentralen Probleme, die sich abzeichnen. Erste Erfahrungen zeigen, dass Menschen generell nicht gut darin sind, über längere Zeit nur zuzuschauen und dann plötzlich und unter hohem Zeitdruck zu reagieren. Es gibt auch Stimmen, die vorschlagen, dass die SAE-Stufe 3 zu überspringen sei, weil damit die menschlichen Fähigkeiten überschätzt würden. Immerhin muss die lenkende Person bei einem Fahrzeug der SAE-Stufe 3 die Fahraufgaben bei Alarm innerhalb von kurzer Zeit und ohne Übung übernehmen, um kritische Situationen zu bewältigen. Deshalb wird vorgeschlagen, dass direkt SAE-Stufe 4 mit spezifizierten Betriebsbereichen und Stufe 5 angestrebt werden sollen (FERSI 2018). Hoch- und vollautomatisierte Fahrzeuge der Stufen 4 und 5 werden oft als «autonome» oder «selbstfahrende» Fahrzeuge bezeichnet. Derzeit ist noch kein Serienfahrzeug in der Lage, vollautonom zu fahren (Yurtsever et al. 2020).



Abbildung 5: Entspanntes Fahren in automatisierten Fahrzeugen ab SAE-Stufe 3 (mit Lenkrad), bis SAE-Stufe 5 (ohne Lenkrad)

Wer treibt die Entwicklung?

Autonome Fahrzeuge können entweder als eigenständiges «Ego-only-System» oder als vernetzt mit Infrastruktur, anderen Fahrzeugen oder als Teil einer Flotte konzipiert werden. Der Ego-only-Ansatz ist derzeit vorherrschend und bedeutet, dass alle notwendigen Fahrvorgänge im Fahrzeug durchgeführt werden. Auch ein solches Fahrzeug kann für die grobe Routenplanung auf externe Lokalisierungs-/Navigationsunterstützung durch Satellitennavigationssysteme zurückgreifen.

Vernetzte Fahrzeuge können über Schnittstellen mit anderen Fahrzeugen (Vehicle-to-Vehicle) oder mit entsprechend ausgerüsteten Teilen der Verkehrsinfrastruktur in ihrem Umfeld Daten austauschen (Vehicle-to-X), z. B. mit intelligenten Ampeln oder anderen Elementen der Verkehrsinfrastruktur. Offen ist, ob die Fahrzeuge neben eigens erzeugten Sensordaten auf externe Informationen für die Lokalisierung und Umgebungswahrnehmung zugreifen, etwa auf hochauflösende Karten und Satelliteninformationen. Heutige Prototypen sind noch in Entwicklung, zumindest noch nicht ausgereift. Wie Fahrzeuge untereinander und mit der Infrastruktur vernetzt werden können, ist ebenfalls Gegenstand intensiver Forschung und Entwicklung.

Schon weit fortgeschritten ist das Platooning bei Lastwagen. Dabei wird das erste Fahrzeug von einem Menschen gesteuert oder überwacht. Die darauffolgenden Fahrzeuge werden digital gesteuert und folgen den voranfahrenden in einer Kette mit minimalem Abstand. Platoons versprechen wegen des geringeren Luftwiderstands energiesparender und wegen eingesparter Löhne kostengünstiger zu sein.

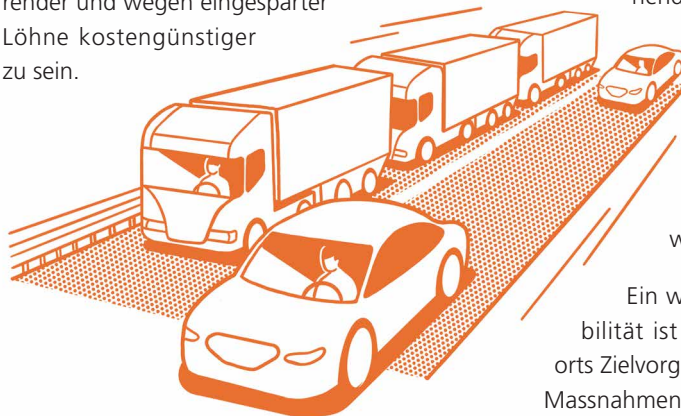


Abbildung 6:
Lastwagen-
Platoon auf
der Autobahn

➔ Automatische Fahrsysteme sind datenerzeugende und -verarbeitende Systeme. Deshalb erstaunt es kaum, dass zentrale Impulse in der Forschung und Entwicklung von IT-Giganten (wie *Waymo* oder *Baidu*) kommen. Die Automobilindustrien in den USA, China, Japan und Deutschland spielen natürlich weiterhin eine massgebliche Rolle in der Entwicklung von entsprechenden Systemen bzw. Fahrzeugen. Jedoch scheint die Entwicklung automatisierter Fahrsysteme in der klassischen Automobilindustrie zunehmend in zeitliche Konkurrenz zur priorisierten Entwicklung von Elektroantrieben zu geraten.

Spitzenreiter *Waymo* betreibt in Arizona, USA, seit Oktober 2020 einen Taxiservice mit Autos ohne Person am Steuer. Auch in der Schweiz gab und gibt es in verschiedenen Städten Pilotprojekte mit Pendelbussen. Investor:innen glauben an die Marktchancen und investierten im Jahr 2020 mehr als 5 Milliarden US-Dollar in *Waymo*. In der Öffentlichkeit und unter Fachpersonen fand in den letzten Jahren eine gewisse Desillusionierung im Hinblick auf autonome Fahrzeuge statt. Durch vermehrtes Testen kamen Schwierigkeiten ans Tageslicht, die vor fünf Jahren noch nicht im Blickfeld des Fachpublikums und der Öffentlichkeit lagen. Dennoch verläuft die Entwicklung automatisierter selbstfahrender Autos rasant, insbesondere nach Durchbrüchen bei der Einführung lernender Computersysteme unter Nutzung künstlicher Intelligenz und neuer Sensorarten wie Lidar (kurz für Light detection and ranging oder Light imaging, detection and ranging), während die Sicherheit und entsprechende Nachweise hinterherzuhinken scheinen.

Ein weiterer Treiber der autonomen Mobilität ist die Politik. Derzeit werden vielerorts Zielvorgaben entwickelt und unterstützende Massnahmen ausgearbeitet. Die Versprechungen hinsichtlich des gesteigerten Komforts, kürzerer und angenehmerer Reisezeiten und erheblicher Kostensenkungen (vor allem im Güterverkehr) stossen auf Gehör. Europäischer Vorreiter ist Deutschland: Im Mai 2021 hat der *Deutsche Bundestag* ein Gesetz verabschiedet, das den Regelbetrieb fahrerloser Fahrzeuge der SAE-Stufe 4

auf festgelegten (öffentlichen) Strassenstrecken schon ab 2022 ermöglicht. In erster Linie soll dies gewerblichen Fahrzeugen wie Pendelbussen und Lieferwagen zugutekommen. Aber auch selbst-fahrende Privatautos sind grundsätzlich erlaubt. Die *Europäische Kommission* fordert beispielsweise in ihrer jüngsten Direktive «die intensive Nutzung hochautomatisierter Fahrerassistenzsysteme zur Verbesserung der Verkehrssicherheit und zur Vermeidung gesellschaftlicher Kosten» (EC 2019).

Die Haltung der Öffentlichkeit und potenzieller Kund:innen ist allerdings noch weitgehend unklar. Es scheint, dass automatisierte Fahrzeuge eher ambivalent bewertet und Vorteile wie auch Risiken unterschiedlich wahrgenommen und gewichtet werden. Eine in Deutschland durchgeführte Umfrage ergab, dass ein Drittel der Interviewten keinerlei Vorteil im automatisierten Fahren sieht (Lemmer 2019).



Gegenwärtige Autos verfügen zum Teil über hochkarätige Assistenzsysteme und können schon vieles. Hersteller sprechen von teilautomatisierten Systemen der SAE-Stufe 2,5 oder 2+.

Automobilhersteller kündigen aufgrund des Marketingeffekts solcher Meldungen oft verfrüht Fahrzeuge mit höherem Automatisierungsgrad an, sie meinen damit zudem meist die Verfügbarkeit erster Fahrzeuge und nicht die Serienreife ganzer Flotten. Dass hochautomatisierte und vollautomatisierte Fahrzeuge (SAE-Stufe 5) dereinst Realität werden, wird heute kaum noch angezweifelt. Umso mehr stellen sich Fragen zu deren Einführung. Viele Studien und Institutionen haben sich mit möglichen Einführungsschritten für Personen- und Gütertransportfahrzeuge auseinandergesetzt und versuchen einzuschätzen, wie schnell automatisierte Fahrzeuge den Markt durchdringen können.

Ein differenziertes Bild ist nur möglich, wenn die Szenarien nach Automatisierungsstufen und Einsatzbereichen aufgeschlüsselt werden. Gleichzeitig muss zwischen der Verfügbarkeit von ersten Fahrzeugen und der kommerziellen Flottenreife unterschieden werden, denn dazwischen liegen Jahre, wenn nicht Jahrzehnte. Verschiedene Studien kommen zu leicht unterschiedlichen Antworten auf die Frage, wann mit automatisierten Fahrzeugen zu rechnen sei:

- Die *European Technology Platform ERTRAC* hat einen möglichen Entwicklungspfad aufgezeigt. Sie kommt zum Schluss, dass der Zeitpunkt der Verfügbarkeit vollautomatisierter Fahrzeuge als noch nicht vorhersehbar gilt. Hingegen könnte die Reife von hochautomatisierten Fahrzeugen schon in wenigen Jahren für den Einsatz im urbanen und suburbanen Raum ausreichen.
- Das *Schweizerische Bundesamt für Strassen* erwartet, dass die ersten hochautomatisierten Fahrzeuge (SAE-Stufe 4) schon 2025 verfügbar sind und für Autobahnen und Schnellstrassen 2030 zugelassen werden könnten (ASTRA 2020).
- Das *Joint Research Center* und das *Generaldirektorat Verkehr und Mobilität der Europäischen Kommission* gehen davon aus, dass selbstfahrende Taxis und Pendelbusse (SAE-Stufe 4) zwischen 2021 und 2024 in kommerziellen Betrieb gehen. Im Güterverkehr wird der Einsatz hochautomatisierter LKW auf offener Strasse schon für 2026/28 erwartet.
- Eine Studie der *Schweizerischen Beratungsstelle für Unfallverhütung (BFU)* kommt zum Schluss, dass hoch- und vollautomatisierte Fahrzeuge 2040 erst einen Marktanteil von 37 Prozent haben werden. Diese Studie fokussiert auf die Übergangsphase mit einem Nebeneinander von Fahrzeugen unterschiedlicher Automatisierungsstufen. Freilich wird es auch dann einen Mischverkehr mit vulnerablen Verkehrsteilnehmenden geben.

Wann werden autonome Fahrzeuge verfügbar sein und sich durchsetzen?

Welche Vorteile werden automatisierten Fahrzeugen zugesprochen?

Selbst wenn die Verfügbarkeit automatisierter Fahrzeuge bald gewährleistet sein sollte, spricht einiges gegen eine schnelle Marktdurchdringung. Die Mehrkosten sind beispielsweise noch schwer abschätzbar. Im Fall einer Ausstattung mit hochzuverlässiger Sensorik könnten diese jedoch erheblich sein und schätzungsweise zehn- bis zwanzigtausend Schweizer Franken je Auto betragen. Derzeit liegen die Kosten für die Sensorik allein im Bereich eines Klein- bis Mittelklassewagens.

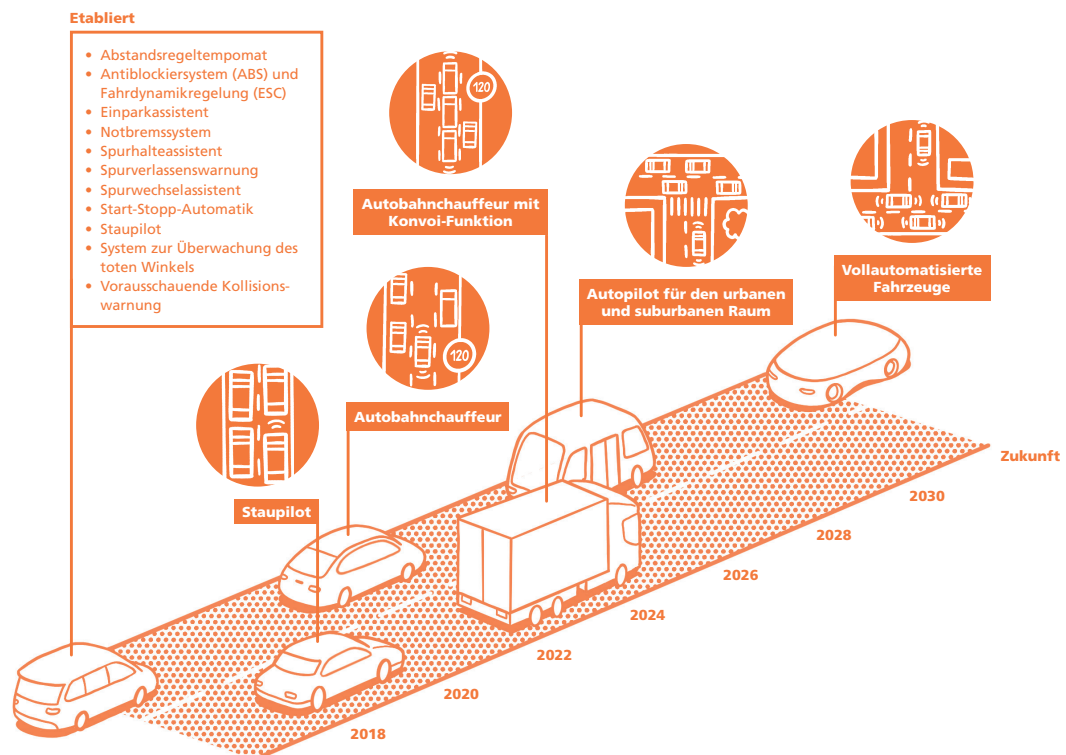
Da viele der Vorteile erst bei einer hohen Durchdringung durch autonome Fahrzeuge zur Geltung kommen, sind Massnahmen und Rahmenbedingungen zu deren zügiger Einführung notwendig. Eine mögliche Massnahme zur zeitlichen Verkürzung der Koexistenz von Fahrzeugen unterschiedlicher Automatisierungsstufen könnte sein, dass Anreize für kollektiv statt individuell genutzte autonome Personenfahrzeuge geschaffen werden. Eine zentrale Überlegung hinter der Förderung der kollektiven Nutzung ist, dass diese Fahrzeuge eine kürzere Lebensdauer aufgrund höherer jährlicher Laufleistungen haben. Deshalb gilt diese Stell-

schraube als besonders vielversprechend (ASTRA 2020). Von einem Verbot älterer nicht-automatisierter Fahrzeuge wird generell abgesehen, da dies das Recht auf Besitzstandswahrung gefährden würde.

➔ Bezüglich der Vorteile automatisierter Fahrzeuge bestehen grosse Erwartungen, die aber allenfalls nicht vollständig oder erst auf lange Sicht erfüllt werden können. Weiter sind diese Verbesserungen für verschiedene Akteure unterschiedlich attraktiv (EC STRIA 2019, Kröger 2021). Die meisten Verbesserungen erfordern hohe (SAE-Stufe 4) bis volle Automatisierung (SAE-Stufe 5) oder setzen gar voraus, dass auf bestimmten Fahrbahnen konventionelle Fahrzeuge verboten sind.

- Deutlich erhöhte Verkehrssicherheit durch die Unterstützung bzw. den graduellen Ersatz der Personen hinter dem Steuer: Automatisierte Systeme gelten als dem Menschen überlegen, insbesondere weil sie keine toten Winkel haben und zu schnellerer Entscheidungsfindung (bessere Vorbereitung und Durchführung komplexer Fahrmanöver) fähig sind. Dadurch können Anzahl und Schwere von Unfällen reduziert werden. Dieser Vorteil ist besonders attraktiv aus gesellschaftlicher und individueller Perspektive.

Abbildung 7: Wann werden autonome Fahrzeuge verfügbar sein? Einschätzung für Assistenzsysteme gemäss ERTRAC 2019.



- Erhöhte Transporteffizienz durch Verringerung von Staus und kritischen Verkehrssituationen: Somit könnte die verfügbare Strassenkapazität effektiver genutzt werden, indem eine erhöhte Homogenität der Verkehrsströme geschaffen wird. Auch ist denkbar, dass Einsparungen bei der Infrastruktur durch schmalere Strassen möglich werden, so der Flächenverbrauch in den Städten sinkt und weniger städtische Parkplätze benötigt werden. Dieser Punkt ist attraktiv aus gesellschaftlicher Infrastruktur-Perspektive.
- Verbesserter Fahrkomfort und erhöhte Zufriedenheit der Kund:innen durch reduzierten fahrbedingten Stress: Damit einhergehend versprechen automatisierte Fahrzeuge eine erhöhte Produktivität durch weniger lästige Aufgaben. Dieser Vorteil ist insbesondere attraktiv für die Lenkenden.
- Ermöglichung individueller motorisierter Mobilität für eingeschränkte Gruppen. Dieser Punkt ist attraktiv für spezifische Bevölkerungsgruppen mit eingeschränkter Mobilität.
- Beitrag zur Reduzierung von Emissionen und Ressourcenverbrauch durch höhere Energieeffizienz, allerdings nur in Kombination mit verändertem Verhalten und innovativen Mobilitätskonzepten, die die kollektive Nutzung autonomer Fahrzeuge miteinschliessen. Dieser Vorteil ist attraktiv aus individueller und gesellschaftlicher Umwelt-Perspektive.



Selbst wenn hoch- oder vollautomatisierte Fahrzeuge ihre Versprechen halten, wird es weiterhin schwere Unfälle mit Verletzten und Toten geben. Die Erwartung eines Nullrisikos bleibt eine gefährliche Illusion. Die Haltung der Öffentlichkeit und potenzieller Kund:innen ist noch weitgehend unklar, eher ambivalent, Vorteile und Risiken werden unterschiedlich wahrgenommen und gewertet. Gleichzeitig haben kürzlich aufgetretene Unfälle zwar zur Ernüchterung beitragen, aber nicht zu harten Rückschlägen in der öffentlichen Wahrnehmung geführt. Den oben beschriebenen Erwartungen zu Vorteilen automatisierter Fahrzeuge stehen Bedenken und Nachteile gegenüber:

- Systemausfälle und technische Probleme wird es auch in Zukunft geben. System-Updates, unterlassene, solche mit unvorhergesehenen Nebenwirkungen oder die Einführung von neuen Automatisierungsstufen könnten zudem das Unfallgeschehen kurzfristig erhöhen.
- Die Kontrolle von Fahrzeugen geht auf autonome Systeme über, die auf künstlicher Intelligenz basieren und für Nichtfachpersonen nur schwer zu verstehen sind. Dies schafft Abhängigkeiten von technischen Systemen, Angst vor Kontrollverlust und kann zu neuen Stressquellen für Nutzer:innen führen.
- Zusätzlicher Autoverkehr, erhöhte Leerfahrtenanteile und zunehmender Strassenverkehr infolge geringerer Nutzung von öffentlichen Verkehrsmitteln sowie stärkere Zersiedelung infolge gesteigerter Komforts.
- Furcht hinsichtlich der Erhebung, Sammlung und Nutzung von noch nie dagewesenen Mengen an persönlichen Daten und des möglichen Missbrauchs dieser Daten. Zudem können automatisierte Fahrzeuge gehackt werden.
- Befürchtung von Dilemma-Situationen, die durch anonyme technische Systeme bewältigt werden müssen.
- Reduzierte Sicherheit, Sauberkeit und Unbehagen bei gemeinsamer Nutzung, weil der Innenraum gegen Manipulationen und Vandalismus geschützt werden muss.

Welche Vorbehalte und Akzeptanzprobleme lassen sich heute erkennen?

Welche technischen Neuerungen sind erforderlich?

↓ Zur Erfüllung der verschiedenen Aufgaben, die das Lenken eines automatisierten Fahrzeugs erfordert, wird eine Reihe von neuartigen Soft- und Hardware-Komponenten benötigt. Meist wird dafür ein modularer Aufbau gewählt. Die dafür eingesetzten Module müssen ineinandergreifen. Deshalb werden sie manchmal als Kette beschrieben.

Um ein automatisiertes Fahrzeug von A nach B zu steuern, müssen externe Ortungsdienste (etwa das US-amerikanische GPS oder das europäische GNSS) zur groben Lokalisierung und Routenplanung mit entsprechendem Kartenmaterial verknüpft werden. Für die Navigation im Nahbereich stützen manche Hersteller das Fahrsystem ausschliesslich auf fahrzeugeigene Datenquellen ab, andere ziehen unterstützend auch externe Navigationssysteme oder hochauflösende Karten heran.

Innovationen bei automatisierten Fahrzeugen

Grundvoraussetzung für automatisiertes Fahren ist das Vorhandensein der dafür nötigen Technologie. Dazu müssen die für das Fahren notwendigen kognitiven Fähigkeiten des Menschen auf ein technisches Fahrsystem übertragen werden. So wie der Mensch wahrnehmen, denken und handeln können muss, um ein Auto zu steuern, muss auch das automatische Fahrsystem die Umgebung wahrnehmen, daraus die richtigen Schlüsse ziehen und handeln können. Das automatisierte Fahrsystem muss in der Lage sein, das Fahrzeug sicher zu lokalisieren, ein digitales Abbild der Umgebung zu liefern und den Betrieb in einer Umgebung zu ermöglichen, die sich laufend verändert und nicht vorausgesagt werden kann. Gleichzeitig müssen Verkehrs- und Verhaltensregeln sowie Optimierungsvorgaben beachtet und gewahrt bleiben.

Zur Wahrnehmung der näheren Umgebung verwenden automatisierte Fahrzeuge verschiedene Sensortechnologien: Kameras, Ultraschall, Lidar und Radar, die alle über spezifische Reichweiten und Leistungsmerkmale verfügen. Im Vergleich zu menschlichen Fähigkeiten schneiden manche Sensortechnologien besser, andere schlechter ab. Die Reflexion von Laserlicht (Lidar) verfügt über eine höhere Auflösung als Radiowellen (Radar) und funktioniert zudem bei Dunkelheit besser als Kameras, ist aber sehr teuer. Die Sensorik produziert sehr grosse Datenmengen, die verarbeitet werden müssen und insbesondere der Steuerung dienen.

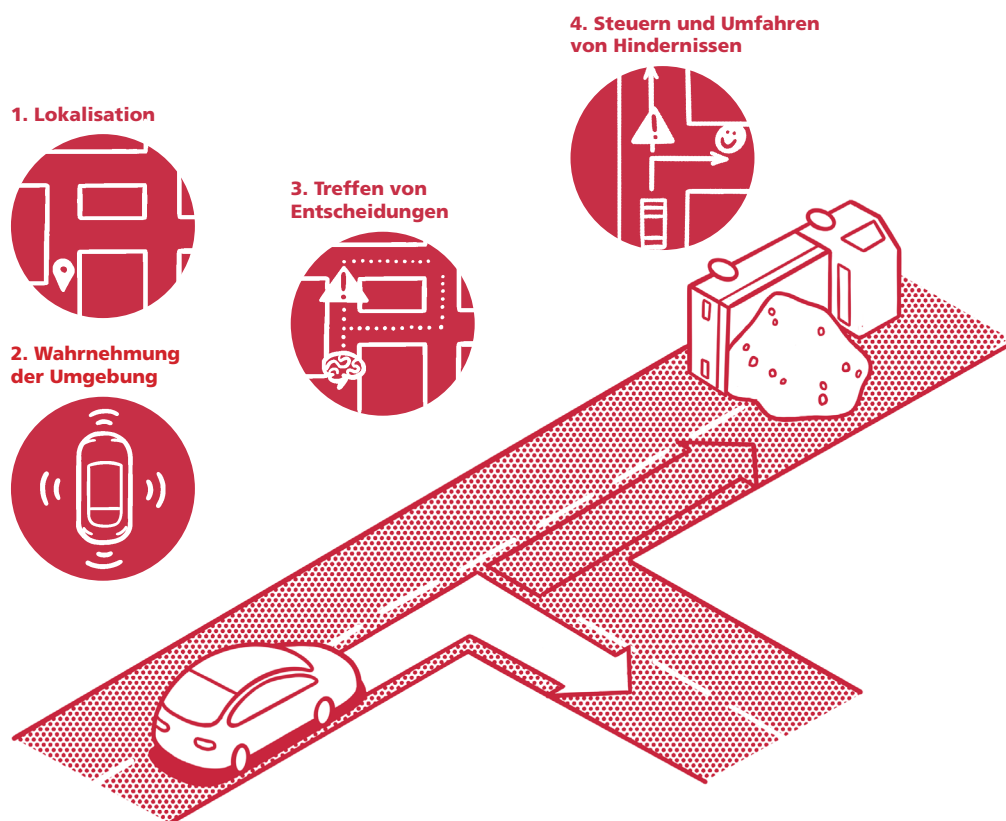


Abbildung 8:
Anforderungen
an autonome
Fahrzeuge

Die Abbildungen 9 und 10 (vgl. S.16 f.) zeigen, über welche Sensoren und Komponenten ein automatisiertes Fahrsystem verfügen muss.

In einem automatisierten Fahrzeug fallen enorme Datenmengen an. *BMW* nennt 40 Terabytes pro Auto und Tag. Eine noch ungeklärte Frage ist das Eigentum dieser Daten. Wahrscheinlich wird es bei den Fahrzeugbetreibenden liegen, in Teilen beim Fahrzeughersteller. Die Datenströme sowie die Verarbeitung dieser Datenmengen müssen gewährleistet werden. Basierend auf diesen Daten

trifft das automatisierte Fahrsystem Entscheidungen. Deshalb müssen diese Daten quasi ad hoc miteinander verschmolzen werden, was angesichts des Umfangs dieser Daten eine grosse Herausforderung darstellt. Die zur Datenverarbeitung und damit zur Steuerung notwendige Software besteht aus einem Stapel an Algorithmen.

Was sind Algorithmen?

Generell sind Algorithmen Handlungsanweisungen, die klar und eindeutig sind und auf einfachen Wenn-dann-Abfolgen beruhen. So besehen sind auch Kochrezepte und Musiknoten Algorithmen. In der Informatik wird unter einem Algorithmus eine in sich geschlossene Abfolge von Computerbefehlen verstanden.

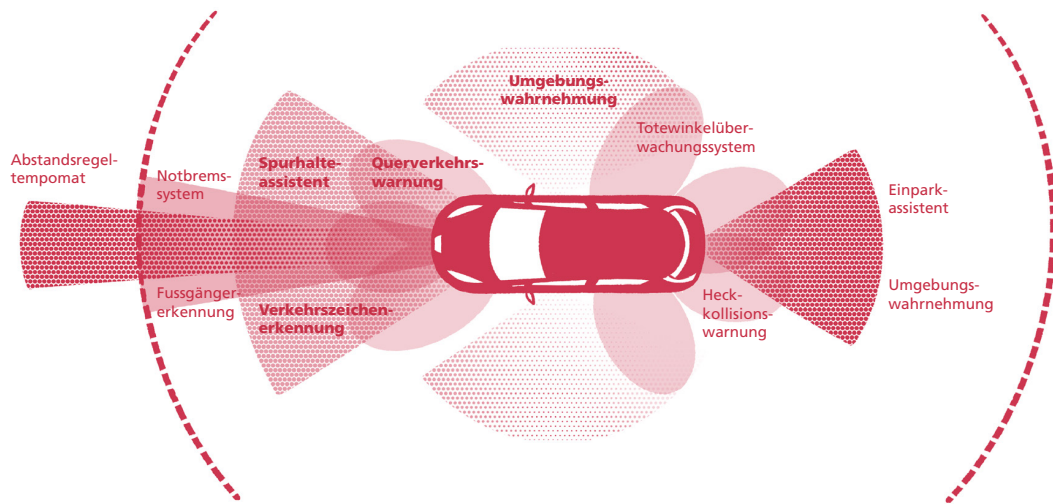


Abbildung 9:
Sensoren und
die von ihnen
abgedeckten Um-
gebungsbereiche.
Gemäss ERSO
2018.

Ferner nutzen automatisierte Fahrsysteme auf künstlicher Intelligenz und maschinellem Lernen basierende Lernprozesse. Erst durch die Kombination der verschiedenen Datenquellen ist das Fahrsystem in der Lage, seine Umgebung korrekt zu analysieren und so die Trajektorie zu planen.

Was ist künstliche Intelligenz?

Künstliche Intelligenz bezeichnet Computersysteme, die basierend auf der Analyse von grossen Datenmengen lernen, Muster zu erkennen, und basierend auf diesen Mustern Zusammenhänge feststellen oder Entscheidungen treffen können. Im Gegensatz zu klassischen Algorithmen können künstlich-intelligente Systeme so auf für sie neue Situationen reagieren.

Aufgrund der komplexen Umgebung auf öffentlichen Strassen benötigen automatisierte Fahrzeuge weit komplexere Software als moderne Flugzeuge (Litman 2018): Ein zeitgenössischer Mittelklassewagen mit Assistenzsystemen der SAE-Stufe 2+ braucht über 100 Millionen Zeilen Programmcode. Ein zeitgemässes Flugzeug, der *Boeing* Dreamliner, kommt dagegen mit lediglich 6,5 Millionen Zeilen Programmcode aus. Trotz grosser Fortschritte gibt es noch viele ungelöste Probleme, so bei der Sen-

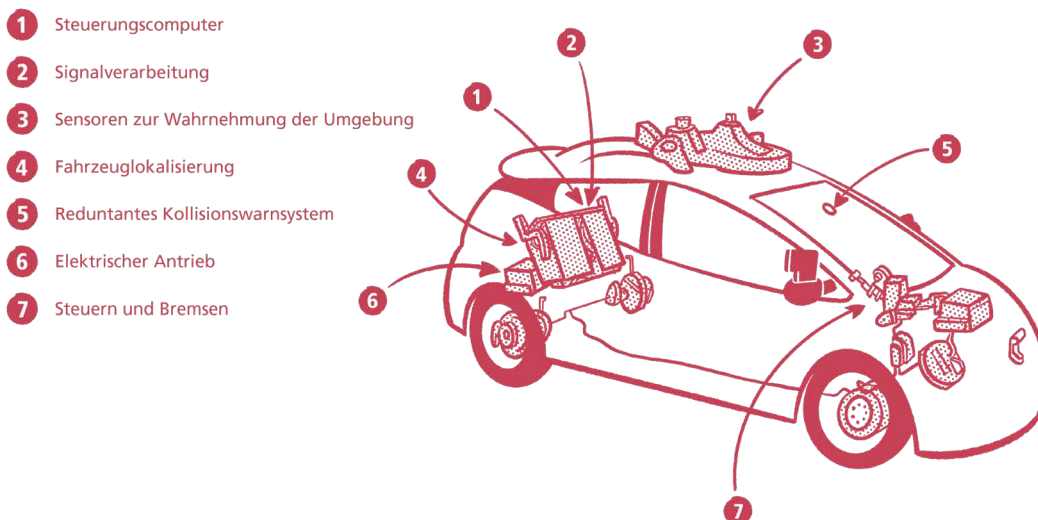


Abbildung 10:
Erforderliche
Komponenten für
ein automatisier-
tes Fahrsystem
gemäss GM Cruise
(GM 2018)

sorik im Bereich der frühzeitigen verlässlichen Objekterkennung bei schlechten Wetterbedingungen mit Regen oder Nebel. Zudem können auch Schneefall, Verschmutzung und Licht der tiefstehenden Sonne die Sensorik empfindlich stören. Zusätzlich stellt sich das Problem von fehlenden oder schlecht sichtbaren Markierungen besonders in Bezug auf den Mittelstreifen oder die Randbegrenzungen.

In vielen Bereichen stehen schwierige Optimierungen an, so bei der Gestaltung der Sensorsysteme, bei notwendigen Redundanzen und beim Abwägen von Zuverlässigkeit gegen Kosten. Gleichzeitig müssen sich diese Systeme in einer Vielzahl möglicher Fahrsituationen als hochverlässlich erweisen.

Bei Fahrzeugen der SAE-Stufe 3 gibt es zudem noch die Schwierigkeit, dass auch die Mensch-Maschine-Interaktionen sehr zeitnah geschehen müssen, insbesondere dann, wenn das automatisierte System sie unvorhergesehen erfordert.

Alle automatisierten Fahrzeuge müssen zudem über externe Einrichtungen verfügen, um eine unmissverständliche Kommunikation zwischen allen Teilnehmenden am urbanen Mischverkehr der Zukunft zu gewährleisten. All das stellt eine nicht zu unterschätzende Herausforderung dar und bedarf des vorausschauenden Handelns samt der Bereitstellung entsprechender Finanzmittel, um die Einführung automatisierten Fahrens zu unterstützen (ASTRA 2020).

Wie viele Unfälle sind auf den zurückgelegten Strecken aufgetreten?

↓ Automatisierte Fahrzeuge haben auf öffentlichen Strassen bereits erhebliche Distanzen zurückgelegt, meist in Staaten der USA mit wenig fordernden Wetterbedingungen, optimalen Strassenverhältnissen und bei geringen Verkehrsdichten. Zwischen 2015 und 2020 beliefen sich die gefahrenen Strecken auf 12,6 Millionen Kilometer. Etwa 61 Prozent davon entfallen auf Fahrzeuge von *Waymo*, 28 Prozent auf solche von *GM Cruise*.

Seit 2016 sind vierzehn schwere Unfälle zu beklagen, acht davon mit Todesfolge. Analysen zu gemeinsamen Ursachen von Unfällen mit automatisierten Fahrzeugen kamen zu folgenden Schlüssen (vgl. Schmid 2020):

- Die Lenkenden vertrauten zu sehr auf das automatisierte Fahrsystem und überwachten dieses nicht ausreichend.
- Die Hersteller stellten nicht sicher, dass ihre Systeme ausreichend funktionsfähig und ausgereift waren und berücksichtigten die möglichen Wechselwirkungen von automatisierten mit manuell gesteuerten Fahrzeugen zu wenig.

Sicherheit autonomer Fahrzeuge

Politische Entscheidungsträger:innen, Genehmigungsbehörden, die Automobilindustrie, die Öffentlichkeit und die Forschung suchen nach Antworten auf folgende Fragen: Wie sicher sollen hoch- und vollautomatisierte Fahrzeuge sein, bevor sie auf öffentlichen Strassen zugelassen werden? Wie sicher sind automatisierte Fahrzeuge wirklich?

- Die Hersteller verwendeten irreführende Begriffe, um ihre Funktionen zu vermarkten – ein Beispiel: *Tesla* spricht vom «Autopiloten» und bezeichnet damit ein System, das menschliche Aufsicht benötigt. Das *Landgericht München* untersagte *Tesla* die Verwendung des Begriffs «Autopilot» mit der Begründung, dieser sei irreführend.

Bisherige Erfahrungen haben Entwicklungsnotwendigkeiten und Sicherheitsdefizite aufgezeigt. Der Umstand, dass trotz idealer Bedingungen Unfälle mit Todesfolge geschehen sind, haben Fragen zur Sicherheit automatisierter Fahrzeuge aufgeworfen. Der Sicherheitsnachweis von robustem automatisiertem Fahren in urbaner Umgebung zusammen mit anderen, sehr unterschiedlichen Verkehrsteilnehmenden einschliesslich Fussgänger:innen und Radfahrer:innen steht noch aus (Yurtsever et al. 2020). Sivak und Schoettle (2015) folgerten, vielleicht etwas zu pessimistisch: «Automatisierte Fahrzeuge sind unter Umständen nicht sicherer als ein durchschnittlicher Autofahrer. Es ist zudem möglich, dass die Unfälle zunehmen in einem Mischverkehr aus selbstfahrenden und von Menschen gesteuerten Fahrzeugen.»

→ Derzeit gibt es noch keine international abgestimmten oder in der Schweiz rechtlich verankerten Standards für automatisierte Fahrzeuge, die vorgeben, wie deren Sicherheit überhaupt gemessen werden kann. Auf die Frage, wie sicher hoch- und vollautomatisierte Fahrzeuge sein sollen, zeichnen sich Antworten auf drei verschiedenen Ebenen ab:

- Auf der Ebene des Gesamtfahrzeugs muss gezeigt werden, dass hochautomatisierte Fahrsysteme traditionelle, von Menschen geführte Autos in ihrer Sicherheit übertreffen, selbst dann, wenn diese mit modernen unterstützenden Systemen ausgestattet sind. Zunehmend wird es als schwierig erachtet, die Systeme so zu gestalten, dass sie diesen Anforderungen genügen. Noch ist nicht abschliessend geklärt, welche Messgrößen (etwa Mortalitätsrisiko) verwendet werden sollen, um die Sicherheit von hochautomatisierten und konventionellen Fahrzeugen zu vergleichen. Vertreter:innen aus Industrie, Wissenschaft und Politik sind dabei, dies zu diskutieren und zu vereinbaren.
- Auf der Ebene der Entwicklung und Herstellung wird der Sicherheitsnachweis an die Hersteller delegiert. Sie werden angehalten, robuste Design- und Validierungsprozesse nachzuweisen. Systemhersteller werden aufgefordert, zu belegen, dass das automatisierte Fahrsystem frei von unangemessenen Risiken ist und dass die Fahrzeuge in der Lage sind, die Strassenverkehrsordnung einzuhalten.
- Auf der Ebene der Komponenten und Subsysteme wird die Sicherheit durch die Einhaltung von internationalen Normen (wie ISO 26262) abgedeckt. Ausgehend von einer Analyse möglicher Gefährdungen werden zugehörige Risiken ermittelt und davon abgeleitet Anforderungen an die Systeme formuliert. Dabei liegt der Fokus auf der Identifizierung von Szenarien, denen das automatisierte Fahrzeug auf der Strasse ausgesetzt sein könnte. Das deutsche PEGASUS-Projekt hat den Begriff der funktionalen Sicherheit eingeführt. Dieser umfasst das sichere Funktionieren von Hard- und Software, die Sicherheit im Fahrbetrieb sowie den Schutz vor böswilligen Cyber-Attacken.

→ Ungeklärt ist die Frage, wann die Fahrzeuge als strassentauglich gelten können. Eine zentrale Schwierigkeit besteht darin, dass die Sicherheit automatisierter Fahrzeuge nicht statisch ist und sich im Betrieb, durch Lern-

prozesse oder durch Updates, verändert. Grundsätzlich wird erwartet, dass sich die Sicherheit im Verlauf der Entwicklung kontinuierlich erhöhen und auch zwischenzeitlich nicht abfallen sollte. Für den Zulassungsprozess zeichnen sich zwei grundsätzlich unterschiedliche Vorgehensweisen ab:

Die USA favorisieren das Paradigma der Selbstzertifizierung. Es basiert u. a. auf dem Grundsatz, so viel wie möglich zu testen. Die Automobilindustrie ist angehalten, intern zu validieren, ob das Fahrzeugdesign den Best-Practice-Standards und einer Reihe recht schwacher regulatorischer Anforderungen entspricht. Zur Unterstützung des Prozesses hat das *US Department of Transport* einen freiwilligen Leitfaden mit zwölf sicherheitsrelevanten Designelementen veröffentlicht (USDOT 2018). Nach dem Nachweis eines angemessenen Sicherheitsansatzes und eines ausreichenden Reifegrades wird das verbleibende Risiko dem Fahrzeughersteller zugewiesen. Erst wenn es zu einem Unfall kommt, wird überprüft, ob der Hersteller die Vorgaben eingehalten hat, falls nicht, wird er mangels Vorsicht zur Rechenschaft gezogen. Die USA können einen solchen selbstbestimmten Prozess wählen, weil sie nicht an internationale Vereinbarungen wie das Wiener Übereinkommen über den Strassenverkehr gebunden sind.

In Europa und den Unterzeichnerstaaten des Wiener Übereinkommens über den Strassenverkehr und des *UNECE*-Vertrags gilt die Typengenehmigung (so auch in der Schweiz). Diese ist in der EU seit 1998 verpflichtend. Letztlich bleiben jedoch die Staaten für die Zulassung verantwortlich. Automatisierte Fahrzeuge (insbesondere Fahrzeuge der SAE-Stufen 3 und 4) können heute im Rahmen des EU-Ausnahmeverfahrens zugelassen werden. Das Verfahren stützt sich nicht allein auf Fahrversuche, sondern lässt auch virtuelle Testverfahren zu. Für virtuelle Tests wird auf Basis intensiver Nutzung vorhandener und eigens generierter Daten ein Katalog repräsentativer Szenarien ausgearbeitet, gegen die das automatische Fahrsystem getestet wird. Neben der Gewährleistung und dem schwierigen Nachweis ausreichender Funktions- und Cybersicherheit ist das sichere Verhalten bei Systemstörungen und -ausfällen nachzuweisen. So müssen die Hersteller beweisen, dass sich das Fahrzeug ohne menschliches Zutun in einen sicheren oder risikoarmen Zustand bringen kann. Wie ein solcher Nachweis erbracht werden kann, zeichnet sich erst in Grundzügen ab.

Welche Sicherheitsstandards gibt es?

Wie soll die Strassentauglichkeit nachgewiesen werden?

Warum sind Testfahrten im Strassenverkehr nicht ausreichend?

→ Testfahrten in realen Verkehrsumgebungen möglichst mit einer geschulten Person am Steuer sind ein naheliegender Weg, um die Sicherheit von automatisierten Fahrzeugen zu bewerten und ihre Systeme zu verbessern. Ein solches Vorgehen würde auch der Komplexität des Gesamtsystems Rechnung tragen. Sicherheit und Unfallraten konventioneller Autos könnten als Benchmark dienen. Zudem würden solche Testfahrten ungelöste Probleme und bislang Unbedachtetes ans Tageslicht bringen.

Eine Studie der *RAND Corporation* rechnet allerdings vor, dass der Zeitaufwand für Testfahrten zum Nachweis der Sicherheit auf realen Strassen allein viel zu gross wäre. Um die Sicherheit mit entsprechend hoher Genauigkeit nachzuweisen, wären 440 Millionen störungsfreie Kilometer erforderlich. Bei einer angenommenen Flotte von 100 automatisierten Fahrzeugen, die 24 Stunden am Tag, 365 Tage im Jahr mit einer mittleren Geschwindigkeit von 40 Stundenkilometern unterwegs sind, würde ein solcher Test 12,5 Jahre dauern (Kalra und Paddock 2016).

Ein derart aufwendiges Testverfahren ist nicht praktikabel. Eine Möglichkeit, wie dieses Problem umgangen werden könnte, ist, Systeme mit hohen Automatisierungsfunktionen in heutige Serienfahrzeuge zu integrieren. Dabei könnten diese Systeme in teilautomatisierten Fahrten evaluiert werden und so wesentliche Kilometer gesammelt werden. Ein Nachteil eines solchen Auswegs ist, dass die Anwendungsfälle nicht hinreichend realistisch und daher von begrenzter statistischer

Was passiert, wenn die autonome Steuerung versagt?

Derzeit wird diskutiert, wie eine weltweite Harmonisierung der Sicherheitsnachweise für den internationalen Markt aussehen könnte. Es finden Gespräche zum Beispiel auf UN-Ebene statt, daran beteiligt sind unter anderem die EU, die USA und Japan.

Sicherlich bleibt eine periodische Zustandsüberprüfung jedes einzelnen automatisierten Fahrzeugs notwendig. Solche Tests können durch eine Behörde erfolgen, etwa durch die Strassenverkehrsämter in der Schweiz oder durch eine delegierte Organisation. Die Frage, wie den unterschiedlichen Lebensdauern von Hardware und von Software Rechnung getragen werden soll, ist noch weitgehend unbeantwortet.

→ Automatisierte Fahrsysteme können versagen und Software kann unentdeckte Fehler haben. Genehmigungsbehörden fordern deshalb den Nachweis, dass wenn ein Problem auftritt oder das automatisierte Fahrsystem nicht sicher funktionieren kann, das Fahrzeug automatisch in einen möglichst sicheren Zustand übergeht, etwa abgebremst wird und ausserhalb des fliessenden Verkehrs am Strassenrand zu stehen kommt.

Die geforderten Massnahmen und technischen Vorkehrungen hängen vom Automatisierungsgrad ab: Bedingt automatisierte Fahrsysteme (SAE-Stufe 3) sollten in der Lage sein, Fehlfunktionen, eingeschränkte Funktionsfähigkeit und Betrieb ausserhalb ihres definierten Einsatzbereichs zu erkennen und die Person hinter dem Steuer aufzufordern, die Kontrolle über das Fahrzeug zu übernehmen. Die zuständigen Behörden in den USA fordern, dass die Hersteller berücksichtigen, dass Lenkende unaufmerksam sein, unter Alkoholeinfluss stehen oder anderweitig beeinträchtigt sein können und sich gegebenenfalls zu sehr an das Funktionieren des automatisierten Fahrsystems gewöhnt haben.

Bei Systemen höherer Automatisierungsstufen muss das automatisierte Fahrsystem selbst, also ohne menschliche Intervention, in der Lage sein, den Zustand minimalen Risikos herbeizuführen. Technisch gehen die Automobilhersteller dabei unterschiedliche Wege – die einen wie *Waymo* sehen vollständig redundante Fallback-Systeme vor, während andere wie *GM* auf eine Kombination aus hochzuverlässigen Normalbetriebskomponenten und zusätzlichen Fallback-Komponenten zur Vermeidung solcher Situationen setzen.

Aussagekraft sind. Neben der Erprobung in bestimmten Anwendungsfällen auf Autobahnen oder in städtischen Gebieten werden alternative, kostengünstigere Simulationsmethoden und Validierungsprozesse benötigt, um die Erprobung in der realen Welt zu ergänzen.



Da hoch- und vollautomatisierte Fahrzeuge komplexe Systeme sind, ist der Sicherheitsnachweis besonders schwierig. Komplexe Systeme haben die Eigenschaft, dass sie Verhalten zeigen können, das nicht durch Kenntnisse über die Einzelkomponenten vorhergesagt werden kann, weil die vielen Einzelteile und Subsysteme auf unerwartete Weise reagieren können. Deshalb muss der Sicherheitsnachweis das Gesamtsystem erfassen und abbilden. Viele der klassischen Analysemethoden, die auf Zerlegung des Systems oder auf linearen Kausalketten beruhen, stossen damit an ihre Grenzen (vgl. Kröger et al. 2019). Geeignere Methoden sind erst ansatzweise vorhanden oder in Entwicklung befindlich. Analysemethoden, die in der Lage sind, Aussagen über sich ändernde Ausfallraten zu machen und Software-Aktualisierungen zu berücksichtigen, müssen erst noch entwickelt werden.

Was ist Komplexität?

Komplexität ist ein Konzept aus der Systemwissenschaft und bezeichnet dort eine Eigenschaft von Systemen. Komplexität führt dazu, dass das Verhalten des Gesamtsystems auch dann nicht vorhersagbar ist, wenn alle Informationen über alle Systemelemente bekannt sind. Somit kann das Verhalten des Gesamtsystems nicht auf seine Einzelteile zurückgeführt werden. Diese für komplexe Systeme zentrale Eigenschaft wird auch als Emergenz bezeichnet. Beispiele für komplexe Systeme sind: Lebewesen, Wetter, soziale Systeme wie Märkte oder die Gesellschaft.

In der Gestaltungs- und Entwicklungsphase der Fahrzeuge reichen zunächst einfachere Methoden aus. Für quantitative Angaben zur Zuverlässigkeit und Sicherheit von Einzelkomponenten, Subsystemen und Gesamtsystemen werden Daten benötigt, die angesichts ihrer Neuartigkeit meist fehlen. Die Industrie behilft sich zunächst mit allgemei-

nen Erfahrungswerten, die unter Nutzung eigener, spezifischer Erfahrungen aus Tests und Fahrerproben laufend angepasst werden. Oft werden lediglich Größenordnungen angegeben oder qualitative Aussagen gemacht. Softwarefehler sind per Test kaum zu identifizieren, insofern stellen sie eine besondere Herausforderungen für die Validierung der Sicherheit dar.

Die im Betrieb automatisierter Fahrzeuge anfallenden Daten spielen denn auch für die anhaltende Sicherheitsbeurteilung eine wesentliche Rolle. Da sich die Sicherheitsbeurteilung über die gesamte Laufzeit des zugelassenen autonomen Fahrzeugs erstrecken muss, wird es wohl einen Rückfluss von Betriebserfahrungen geben. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit zu einer internen Datenaufzeichnung mit Zugang für Fahrzeughersteller und Behörden. Ein solcher Datenspeicher entspricht einer Black Box in Flugzeugen. Datenbanken mit Daten unterschiedlicher Formate und Qualität sind nötig. Zudem werfen die anfallenden Daten rechtliche Fragen nach Eignung und Legitimität von Stellen auf, die diese Daten auswerten. Weitere offene Fragen sind: Wie diese Daten systematisch ausgewertet werden, wer Kontrolle über und Einsicht in die anfallenden Daten hat und wie diese geschützt werden können.



Der Sicherheitsnachweis muss den gesamten Lebenszyklus eines Fahrzeugs abdecken und beginnt mit der prinzipiellen Systemgestaltung und ersten Systemauslegung, führt über Simulationen, Tests und Nachbesserungen. Sie endet mit der Zertifizierung. Eine solche Prozedur zur Validierung der geforderten Sicherheit ist bislang noch nicht einvernehmlich etabliert.

Einen wesentlichen Schritt in diese Richtung hat die Arbeitsgruppe «Automated/Autonomous and Connected Vehicles» der *UNECE* gemacht. Sie hat ein Framework vorgeschlagen, das neue Beurteilungs- und Testmethoden für automatisiertes Fahren umfasst.

Mit welchen Methoden kann die Sicherheit bewertet und nachgewiesen werden?

Wie kann die Sicherheit validiert werden?

Das Framework besteht aus fünf Methoden zur Validierung:

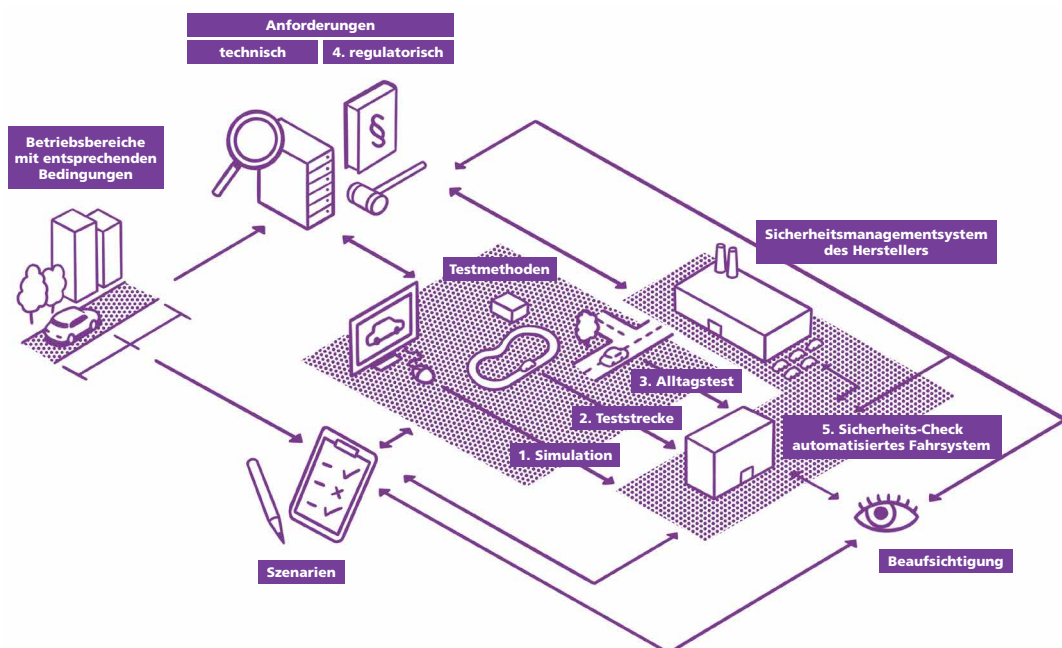
- 1 Virtuelle Tests (Simulationen) unter Verwendung verschiedener Arten von Simulationswerkzeugen. Damit soll die Einhaltung der Sicherheitsanforderungen für eine breite Palette virtueller Szenarien bewertet werden. Virtuelle Tests können entweder komplett mittels Computer durchgeführt werden oder sie finden in einem Labor oder auf einem Testgelände statt, wo ein Sensor, ein Subsystem oder das gesamte Fahrzeug mit einer virtuellen Umgebung interagiert. Software- oder Hardwarefehler können absichtlich injiziert werden, um das System herauszufordern oder um Testprozeduren zu beschleunigen.
- 2 Streckentests auf gesondertem Gelände mit verschiedenen Szenario-Elementen. Damit sollen Fähigkeiten und Funktionsweise eines automatisierten Fahrsystems getestet werden.
- 3 Tests auf öffentlichen Strassen zur Bewertung des automatisierten Fahrsystems unter realen Verkehrsbedingungen.
- 4 Vorgabe für Audit- und Bewertungsverfahren, die festlegen, wie der Hersteller den Nachweis gegenüber den Behörden zu erbringen hat.
- 5 Überwachung während des Betriebs und Berichterstattung über die Sicherheit des automatisierten Fahrsystems nach der Inverkehrsetzung. Die Datenerfassung soll auch genutzt

werden, um aus gravierenden Zwischenfällen und Unfällen zu lernen.

Dieses Framework basiert auf einem Katalog von Szenarien, die sich während realer Fahrten unter repräsentativen Bedingungen ergeben und die das System herausfordern könnten. Ein solcher Katalog umfasst sowohl die Art und Beschaffenheit der Strasse, Typen von Strassennutzenden, statische und sich bewegende Hindernisse sowie diverse weitere Umweltbedingungen. Szenariobasierte Ansätze werden favorisiert, weil sie als hilfreich angesehen werden, um eine ausreichende Abdeckung von Verkehrssituationen vor der Markteinführung zu gewährleisten. Sie helfen, das automatisierte Fahrsystem gegen Umgebungen zu testen, die in der realen Welt nur schwer, wenn nicht gar unmöglich anzutreffen wären. Um solche komplexen Szenarien zu erarbeiten, werden Daten zum Verkehr, zur Umgebung des Fahrzeugs samt anderen Verkehrsteilnehmenden, zur Dynamik des Fahrzeugs selbst mit einem digitalen Abbild der untersuchten Fahrfunktionen (wie das Einfädeln in eine Fahrspur) kombiniert. Schliesslich wird deren Zusammenwirken getestet und evaluiert.

Um die Unmenge an Szenarien zu bändigen und den Umfang geforderter Tests auf das Machbare einzugrenzen, wurde das Konzept der kritischen Szenarien entwickelt. Viele Vorschläge zielen darauf ab, die Anzahl an Szenarien auf wirklich kritische zu reduzieren. Dies kann etwa durch Einengung des Parameterraums oder besondere Auswahlverfahren geschehen.

Abbildung 11: Wie kann die Sicherheit validiert werden? Abbildung gemäss einem Vorschlag der UNECE 2021.



Neben solchen szenarienbasierten Tests werden auch vorhandene Daten genutzt. Dazu zählen statistische Felddaten über das Verhalten von Lenkenden oder über Verkehrsunfälle. Zusätzlich werden Informationen von speziell ausgestatteten Messfahrzeugen zu Strassenabschnitten oder Kreuzungen gesammelt.

Um sicherzustellen, dass keine wichtigen Szenarien übersehen werden, dass die Daten und Szenarien ausreichen, ist vorgesehen, kontinuierlich Echtweltdaten aus dem Fahrbetrieb zugelassener Fahrzeuge zu sammeln. Diese gesammelten Daten sollen geprüft werden, um festzustellen, ob diese eine unerwartete Herausforderung für das jeweilige automatisierte Fahrsystem beinhalten.

→ Autonomes Fahren kann und wird mit neuen und unbekanntem Risiken verbunden sein, beispielsweise durch falsche maschinelle Wahrnehmung der Umgebung und Entscheidungsfindung im Fahrzeug, unvollständige Verifizierung der Umgebung oder Hardware- und Softwarefehler komplexer elektronischer Systeme. Fehler können nicht nur einzelne Autos, sondern ganze Flotten betreffen. Derartiges wird passieren, und selbst kleine Ausfälle von Fahrzeugbetriebssystemen können katastrophale Folgen haben. Angesichts des frühen Entwicklungsstadiums autonomer Fahrzeuge und der begrenzten Wissensbasis ist es schwierig, die damit verbundenen Risiken zu identifizieren und zu bewerten. Einerseits wird erwartet, dass autonomes Fahren die Unfallrate deutlich reduziert. Andererseits könnten durch koordinierte automatisierte Fahrzeuge eine Reihe neuer Unfallursachen und zusätzlicher Risiken entstehen und dadurch die Wahrscheinlichkeit von Ereignissen mit hoher Schwere zunehmen.

Ursachen für zu erwartende Risiken lassen sich wie folgt weiter detaillieren:

- Unzuverlässige Sensorinformationen sowie Fehler bei der Interpretation der Daten und Steuerung des Fahrzeugs durch verzerrte Signale, Mängel im Design und/oder Herstellung der Hard- und Software automatischer Fahrzeuge, Softwarefehler oder unzuverlässige Systemfunktionen unter ungünstigen Bedingungen.
- Lücken in der 5G-, GPS- oder GNSS-Abdeckung führen unter Umständen dazu, dass Autos nicht lokalisiert werden oder sie nicht untereinander oder mit der Infrastruktur kommunizieren können.

Ferner ist denkbar, dass Autos nicht über Wetterdaten, Karten oder Verkehrsinformationen verfügen.

- Unerwartete extreme Umweltbedingungen, die von automatisierten Steuerungssystemen nicht abgedeckt werden.
- Misslingen der Übernahme aus dem automatisierten Fahrmodus: Je nach Automatisierungsstufe muss die Person hinter dem Steuer nach Alarmierung die Fahraufgaben übernehmen. Dies kann misslingen, sei es, weil die Person abgelenkt ist oder aus anderen Gründen nicht schnell genug reagiert.
- Fahren mit geringen Abständen: Ein Versprechen hochautomatisierter Fahrzeuge ist, dass sie in dedizierten Fahrspuren mit geringeren Abständen fahren werden. Gerade bei hoher Geschwindigkeit mit wenig Zeit zur Reaktion ergibt sich daraus bei unvorhergesehenen Ereignissen die Möglichkeit von folgenschweren Unfallkaskaden.
- Trotz sorgfältiger Validierung sind Ausfälle durch unzureichende Updates denkbar.
- Darüber hinaus können autonome Fahrzeuge auch bedeutenden Cyber-Risiken ausgesetzt sein, wenn sicherheitskritische Systeme ungenügend geschützt werden. Dies betrifft insbesondere die Nutzung von internetbasierten Unterhaltungs- und Kommunikationssystemen wie auch drahtlose Kommunikationskanäle.
- Unangemessene oder falsche Bedienung: Einerseits könnten Nutzende ihre eigenen Fähigkeiten überschätzen, der Technologie misstrauen und die Nutzung automatisierter Systeme verweigern oder sie ausschalten. Andererseits besteht die Gefahr, dass die Nutzenden die Technologien überfordern oder zusätzliche Risiken eingehen, z. B. weniger aufmerksam sind, sich seltener anschnallen, das Fahrzeug fahrlässig auf schnellere Fahrt programmieren und so weiter.
- Komplexität des gemischten Verkehrs: Algorithmen könnten nicht in der Lage sein, die Verhaltensmuster anderer Verkehrsteilnehmender einschliesslich ihrer Absichten und Gesten, aber auch potenzielle Missverständnisse zu erkennen und zu integrieren. Ferner ist denkbar, dass Fussgänger:innen, Radfahrende oder Lenkende ihr Verhalten anpassen und riskantere Manöver unternehmen.

Welche Risiken sind bereits absehbar?

Wie sehen Zukunftsbilder der Mobilität aus?

Zukunft der Mobilität: Konzepte

↓ Die Zukunft des Verkehrs ist höchstwahrscheinlich digital, geteilt und multimodal. So basieren zukünftige Mobilitätskonzepte auf einer Vernetzung der Verkehrsträger, auf Sharing-Konzepten, einer Aufhebung der Unterscheidung von Individual- und Kollektivverkehr sowie auf Mobility-as-a-Service-Anwendungen. Die Digitalisierung des Verkehrs dient der Angebotssteuerung und einer effizienteren Ressourcenzuweisung. Vernetzte Fahrzeuge könnten beispielsweise Stausituationen in Städten vermeiden oder dank der Kommunikation untereinander bei höherer Geschwindigkeit auf die Autobahn einfädeln. Durch das vollständige digitale Abbilden der verschiedenen Verkehrsträger können übergreifende Angebote geschaffen werden, die eine effiziente Verkehrsplanung ermöglichen. So bestehen zukünftige Mobilitätskonzepte aus einem gut ausgebauten öffentlichen Verkehr, der durch niederschwellige On-Demand-Services ergänzt wird. Teil solcher Konzepte ist, dass hochautomatisierte Personenkraftwagen künftig vor allem kollektiv genutzt werden.

Grundlage zukünftiger Mobilitätskonzepte sind Plattformen zum Austausch von Daten, die von den verschiedenen Mobilitätsdienstleister:innen

Während der gesellschaftliche Diskurs in den vergangenen Jahren vornehmlich auf selbstfahrende Autos samt zugehöriger Technik fokussierte, zeichnet sich derzeit ein Umdenken ab: Fachpersonen sind sich einig, dass sich die wirtschaftlichen, sozialen und ökologischen Herausforderungen verursacht durch die gesteigerten Mobilitätsbedürfnisse nur mittels neuer Konzepte lösen lassen. Das Eidgenössische Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK) geht in der jüngsten Verkehrsperspektive (2021) davon aus, dass der Personenverkehr um 11 Prozent und der Güterverkehr um 31 Prozent bis ins Jahr 2050 zunehmen wird.

genutzt werden, um die einzelnen Verkehrsträger aufeinander abzustimmen und personalisierte Verkehrsdienstleistungen zugänglich zu machen. Fachpersonen aus den Bereichen Verkehrsplanung und Verkehrsdienstleistung versprechen sich von solchen Plattformen, dass sie den Verkehr bedarfsgerecht und ressourcenschonend lenken können. Dadurch sollen Staus und Leerfahrten vermieden werden. Mobilitätskonzepte der Zukunft erfordern eine Vielzahl von Neuerungen in der Infrastruktur.

Mobility-as-a-Service-Anwendungen öffnen Türen für neue Geschäftsmodelle. Es zeichnet sich ab, dass die Mobilität der Zukunft die Grenze von individueller und kollektiver Mobilität auflöst und sich Angebote etablieren werden, die Elemente aus beiden Bereichen kombinieren, wie bspw. On-Demand-Busse und Verkehrsmittel, die ihre Routen und Haltestellen so wählen, dass sie den Bedürfnissen ihrer Kundinnen und Kunden am besten entsprechen und gleichzeitig Staus vermeiden. Damit geht das Versprechen einher, dass der Verkehr situativ gesteuert werden kann. So verfolgt die Schweiz, wie viele andere Länder auch, das Ziel eines Verkehrs mit vernetzten automatisierten Fahrzeugen. Dazu muss die bestehende Verkehrsinfrastruktur z. B. um intelligente Ampeln

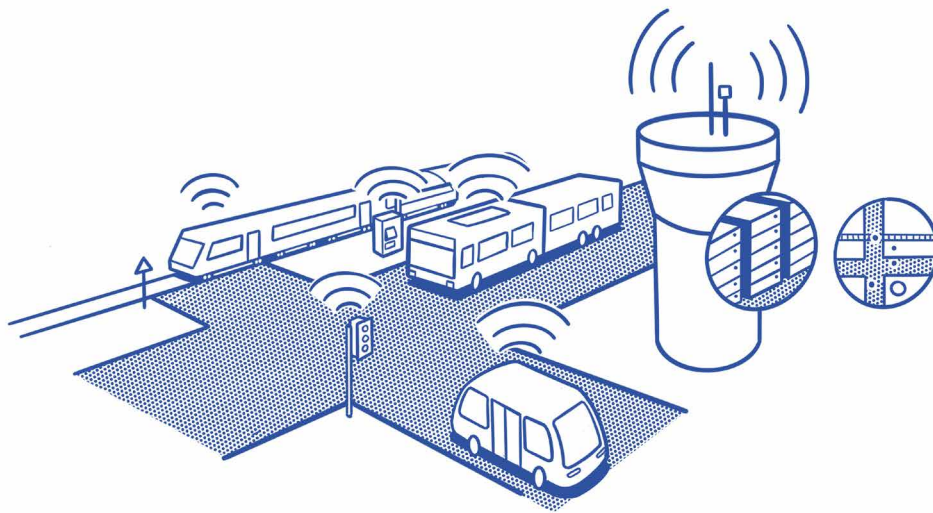


Abbildung 12: Die Vernetzung der verschiedenen Mobilitäts-träger ist eine der wesentlichen Grundlagen von Mobility-as-a-Service-Anwendungen.

und Kreuzungssteuerungssysteme ergänzt werden. Damit die Sensoren die Strassenführung eindeutig erkennen, braucht es entsprechende Markierungen.

Was ist Mobility-as-a-Service?

Mobility-as-a-Service besteht darin, dass verschiedene Transportleistungen kombiniert und multimodal angeboten werden. Dadurch sollen Privatfahrzeuge durch Angebote ersetzt werden, die auf das jeweilige Bedürfnis der Kundinnen und Kunden zugeschnitten sind. Mobility-as-a-Service-Anwendungen sollen zentral von einem Interface wie einem Smartphone aus gebucht werden können. Eine Reise wird u. U. verschiedene Verkehrsträger umfassen: etwa ein Leihfahrrad von zuhause bis zum Einkaufsladen und auf der Rückreise eine Kombination aus Taxi und Bus oder ein Auto, das einem lokalen Car-Sharing-Anbieter gehört und hochautomatisiert ist oder nicht.

Services verschiedener Mobilitätsanbieter erscheinen integral als eine Dienstleistung, unabhängig von spezifischen Verkehrsträgern und einzelnen Anbietern. Vorreiter solcher Dienstleistungen ist ein finnisches Start-up, das bereits heute solche Dienstleistungen anbietet und in Helsinki demonstriert hat, dass solche Konzepte funktionieren. Noch ist offen, wie der Datenaustausch zwischen den Fahrzeugen und zwischen Fahrzeug und Infrastruktur gewährleistet wird. Damit dies gelingt, müssen entsprechende Kommunikationskanäle aufgebaut werden.



Neben den Neuerungen in der Infrastruktur und bei den Betriebskonzepten braucht es Anpassungen der gesetzlichen Regelungen. Verpasst der Gesetzgeber die Chance, heute die Weichen richtig zu stellen, werden diese Dienste womöglich von global agierenden Internetkonzernen übernommen. Das hiesse, dass die Mobilität der demokratischen Kontrolle entzogen würde. Deshalb steht der Gesetzgeber heute vor der Herausforderung, die rechtlichen Leitplanken so zu setzen, dass neue Technologien erprobt und eingeführt werden können. Zudem braucht es spezifische Anreize, damit die heutigen Mobilitätsdienstleister ihre Angebote digitalisieren.

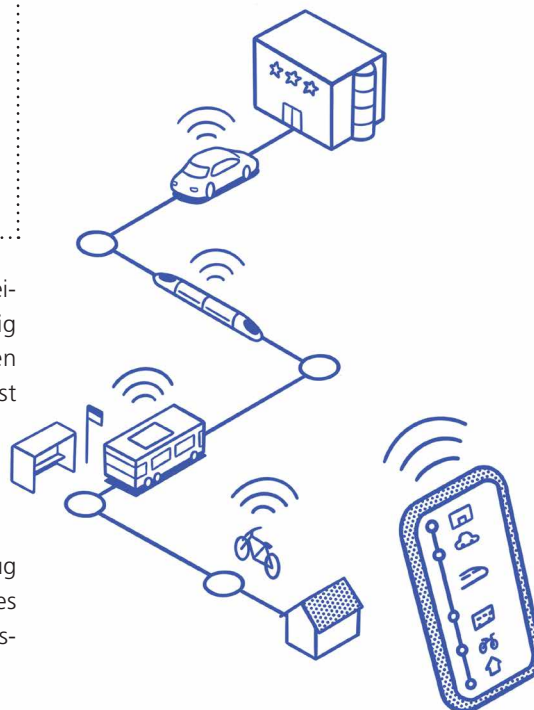


Abbildung 13: Bei Mobility-as-a-Service-Anwendungen erscheinen verschiedene Mobilitätsträger als eine integrale Dienstleistung.

Welche Rahmenbedingungen sind wünschenswert?

Die Entwicklung, Produktion und Zulassung von automatisierten Fahrzeugen erfolgt für den gesamten europäischen Markt, auch deren Nutzung ist meist länderübergreifend; der rechtliche und organisatorische Rahmen ist entsprechend zu entwickeln. Wie in Verkehrsfragen in Europa üblich, wird dies durch eine weitgehende Harmonisierung der technischen Ausgestaltung und Zertifizierung der Fahrzeuge auf der Basis verbindlicher internationaler Standards und Regeln erreicht. Sie werden von Organisationen wie der *UNECE*, *ISO* oder *CEN* ausgearbeitet und auf nationaler Ebene umgesetzt.

Die *Deutsche Akademie der Technikwissenschaften acatech* kommt in ihrer Studie «Neue autoMobilität II» zu dem Schluss: «Der Erfolg des automatisierten und vernetzten Fahrens hängt nicht mehr von der technologischen Marktreife ab, sondern massgeblich von der grundsätzlichen Akzeptanz der Technologie» (Lemmer 2018: 76). Fehlende Akzeptanz könnte sich zu einem «show stopper» entwickeln; ihr liesse sich durch breit angelegte partizipative Prozesse zur Gestaltung der zukünftigen Verkehrssysteme entgegenwirken. So zeigen Umfragen zur Einstellung der Bevölkerung gegenüber autonomen Fahrzeugen und neuen Verkehrskonzepten, dass die Bereitschaft, selbstfahrende Fahrzeuge zu nutzen und von neuen Verkehrskonzepten zu profitieren, einerseits vom Vertrauen in Wissenschaft und Technik abhängt, andererseits vom Wissen über solche Fahrzeuge und Konzepte. Je grösser das Vertrauen und Wissen, desto grösser die Wahrscheinlichkeit, dass die Angebote genutzt werden.

Die Mehrzahl der Studien zu hochautomatisierten Fahrzeugen und zukünftigen Mobilitätskonzepten fordern, einen Abstimmungsprozess unter den Hauptbeteiligten für die weiteren Implementierungsschritte (vgl. *AustriaTech* 2021: 23; Lemmer 2018: 84; *ASTRA* 2020: 57), gar einen Governance-Prozess zu initialisieren. Darunter wird ein sich entfaltender Entscheidungsprozess verstanden, der verschiedene Akteur:innen einschliesst, koordiniert werden muss und allenfalls der Schlichtung bedarf (Kröger 2019). Wie und unter welcher Führung dies geschieht, ist allerdings noch offen.

Die Forderung nach einem breit angelegten Abstimmungsprozess hat mehrere Gründe. Als gesellschaftlich-technisches Phänomen sind die neuartigen Mobilitätssysteme ungemein komplex und zudem mit Unsicherheiten und Ambiguitäten behaftet. Sie basieren auf grossflächiger und umfassender Infrastruktur mit unzähligen Komponenten und involvieren zugleich eine Vielzahl von Akteur:innen. Diese reichen von den Verkehrsbetrieben über Taxifahrer:innen, Automobilist:innen bis zu den Nutzenden des ÖV und des Langsamverkehrs, die alle aufeinander reagieren und in mannigfachen Wechselwirkungen stehen. Gleichzeitig hängt die weitere Entwicklung von vielen Variablen ab und ist nur schwer zu prognostizieren. Damit unter diesen Umständen eine nachhaltige und bedarfsgerechte Verkehrsplanung möglich ist, müssen die lokalen Gegebenheiten und jeweiligen Bedürfnisse erfasst und berücksichtigt werden. Mancherorts werden diese lokalen Umstände in eine überregionale, gar internationale Standardisierung einfließen. Dieser Komplexität kann nur durch einen breiten öffentlichen Diskurs Rechnung getragen werden, an dem alle wichtigen Stakeholder beteiligt sind, auch um organisatorische Fragen zu regeln und die Systeme im Sinne der Nutzenden zu gestalten.

Im Rahmen des Implementationsprozesses gibt es Sachverhalte, die auf internationaler Ebene geregelt werden, etwa die Gewährleistung ausreichender Sicherheit im Rahmen der Typenzulassung von Fahrzeugen für den nationalen und grenzüberschreitenden Verkehr. Andere Fragen werden national geregelt – etwa durch Strassenverkehrsgesetze oder -verordnungen. Wieder andere Fragen erfordern die Koordination und Zusammenarbeit von Mobilitätsdienstleister:innen. Diese Ausgangslage erfordert nicht nur neue Infrastrukturen, sondern auch neue Organisationsformen, etwa zum Aufbau einer breit genutzten Datenplattform, wie sie in der Schweiz derzeit im Projekt «Nationale Dateninfrastruktur Mobilität» realisiert wird.

Referenzen

- ASTRA, Auswirkungen des automatisierten Fahrens; Erkenntnisse und Massnahmen aus Sicht des ASTRA, Oktober 2020
- ASTRA, Auswirkungen des automatisierten Fahrens, Teilprojekt 3: Umgang mit Daten, Oktober 2020
- M. Deublein, Automatisiertes Fahren – Mischverkehr, bfu, 2020
- Schweizerische Eidgenossenschaft, Automatisiertes Fahren – Folgen und verkehrspolitische Auswirkungen, Bericht zur Erfüllung des Postulats, Leutenegger Oberholzer 14.4169 «Auto-Mobilität», 21.12.2016
- USDOT/NHTSA, Automated Driving System 2.0, A Vision for Safety, 2018
- ISO 26262:2018 International Standard, Road vehicles
- ISO PAS 21434:2019
- EC STRIA Roadmap on Connected and Automated Transport, Directorate-General for Research and Innovation, 2019
- ERTRAC, Connected automated driving roadmap, Version: 8, 3/2019.
- EC Directive 2007/46/EC on the approval of motor vehicles, 2007.
- EC/ERSO, Autonomous vehicles & traffic safety, 2018 (www.erso.eu).
- European Union, Regulation (EU) No. 858/2018 on vehicle approval and market surveillance.
- FERSI, Safety through automation? Position paper, Jan. 2018.
- General Motors, Self-Driving Safety Report, 2018
- S. Hallerbach, Y. Xia, U. Eberle, F. Köster, Simulation-based identification of critical scenarios for cooperative and automated vehicles, SAE Technical Papers, April 2018.
- N. Kalra and S. M. Paddock, How many miles of driving would it take to demonstrate autonomous vehicle reliability? RAND Corporation, 2016.
- K. Lemmer (ed.), Neue autoMobilität II – Kooperativer Strassenverkehr und intelligente Verkehrssteuerung für die Mobilität der Zukunft, acatech, 2019.
- UNECE, New assessment/test method for automated driving (NATM), informal document WP.29-183-05, 9-11.3.2021
- W. Kröger, C. Nan, Power Systems in Transition – Dealing with Complexity, in C. Büscher, J. Schippl, P. Sumpf (editors), Energy as a Sociotechnical Problem, Routledge, 2019
- W. Kröger, Autonomous Driving: A Survey with Focus on Reliability and Risk Issues, Special Issue ESREL 2020/ PSAM 15, Environment and Decisions, under review, submitted June 2021
- M. Sebastian, Model-based Certification of Automated Vehicles, Master Thesis, MIT, 2020
- E. Yurtsever et al., A survey of autonomous driving: Common practices and emerging technologies, IEEE Access, Vol. 8. 2020.

Vertiefende Einzelbeiträge

Simulation-Enabled Methods for the Development, Testing and Validation of Cooperative and Automated Vehicles <i>S. Hallerbach, U. Eberle, F. Köster</i>	30
Simulation of Abstract Scenarios: Towards Automated Tooling in Criticality Analysis <i>J. S. Becker, T. Koopmann, B. Kramer, C. Neurohr, L. Westhofen, B. Wirtz, E. Böde, W. Damm</i>	42
Autonomous driving safety validation: A method to overcome parameter space explosion using Importance Analysis, Surrogate modeling, and informed sampling <i>M. Zanella, M. L. Shehab, A. Ayoub</i>	52
Sensing and Perception in Automated Driving <i>C. Hohl, D. Milojevic, M. Elser</i>	64
From development to road approval and organized experience feedback in Europe <i>M. C. Galassi, A. Lagrange, B. Ciuffo</i>	72
Verantwortliche Gestaltung des autonomen Fahrens. Ethische Aspekte und ihre Relevanz <i>A. Grunwald</i>	78
Vision zukünftiger, digitalisierter und vernetzter Mobilitätskonzepte I <i>M. Jipp, K. Lemmer</i>	86
Vision zukünftiger, digitalisierter und vernetzter Mobilitätskonzepte II <i>T. Küchler, M. Schmidt, M. Erne, M. Sutter</i>	93
Effects of automated driving – A framework for action <i>H. Fehlbeg</i>	98
Automated driving in Switzerland – safety challenges of mixed traffic <i>M. Deublein</i>	107

Simulation-Enabled Methods for the Development, Testing and Validation of Cooperative and Automated Vehicles

Sven Hallerbach¹
 Ulrich Eberle²
 Frank Koester¹

Abstract

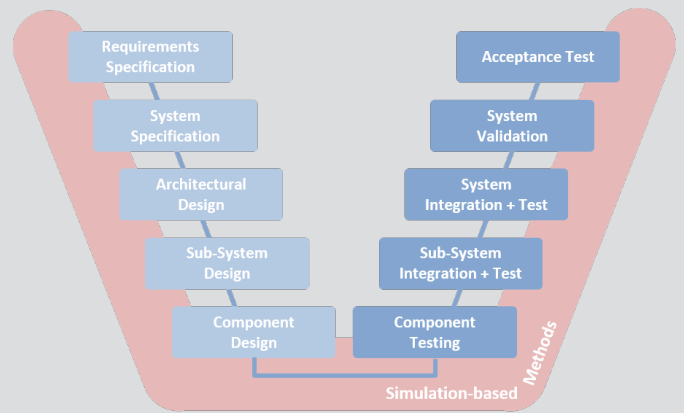
The release and public deployment of cooperative and automated vehicles remains a major challenge for the automotive industry. Despite the recent progress made by worldwide initiatives in this field, including the PEGASUS family of projects, demand for comprehensive simulation-enabled development, test and validation methodologies for cooperative and automated driving continues to rise. In addition, the number of applications can be expected to grow as well. Integrated AI components in particular are inherently complex systems that require automated, simulation-enabled and standardized methods and tools throughout the development and application chain.

The procedures need to be automatically set up and configured in such a way that they allow for an “as a service” approach. For this reason, an open testing architecture that operates similarly to a “bus system” using standardized components and interfaces is proposed. This represents a step towards a plug-and-play testing approach that supports the independence and exchangeability of components, systems-under-test, operational environments, scenarios, etc. Thus, an open testing architecture of this kind can be optimally utilized for scenario-based testing, which currently seems to be the best way forward in ensuring the safety of cooperative and automated vehicles. Development and testing across the entire spectrum of simulation-enabled methods, such as Model-in-the-Loop (MiL), Software-in-the-Loop (SiL), X-in-the-Loop (XiL) and Prototype-in-the-Loop (PiL), are supported up to non-virtual testing on proving grounds and traffic systems.

1.1 Introduction

Simulation-based procedures, methods and tools/ toolchains are extremely important for a wide range of engineering tasks during the development of automated and connected vehicles and AI components (cf. Figure 1.1).

Figure 1.1: Simulation-based procedures, methods and tools for a wide range of engineering tasks [1]



Thus, it is possible to deal with the inherently complex advanced AI-based technologies, the wide range of functionalities as well as challenging environments, e.g. urban areas equipped with intelligent traffic infrastructures and communication technologies and also increasingly important backend systems. With a focus on behavioural

¹ German Aerospace Center (DLR)
² Opel Automobile GmbH

and dynamic aspects respectively, a large number of traffic scenarios and various traffic participants, in particular cyclists and pedestrians, who often exhibit non-normative or almost entirely unpredictable behaviour, have to be considered.

Along with these tasks, a wide range of users have to be supported by simulation-based procedures, methods and tools. One single tool is generally incapable of fulfilling their diverse needs and objectives. It is essential to couple or integrate different tools. This is where the idea of “simulation as a service” comes in.

Our article explores these topics and puts forward a concrete approach to organizing such methods and toolchains that benefits particularly from already existing standards. This approach is further refined and demonstrated for applications and engineering tasks that are currently of high practical relevance, such as developing and testing cooperative and automated vehicles and AI components.

1.2 Applications

Automated driving is one of the biggest and most inspiring engineering challenges of our age, since it combines automotive technology, conventional robot approaches and artificial intelligence-based methods in one complex safety-critical system, namely the automated driving system-equipped (ADS-equipped) vehicle. Simulation-enabled technologies already play a highly important role in

each of the underlying basic technologies, and will only become increasingly important going forward.

Applications for these approaches can be roughly structured as follows:

- Rapid prototyping of early development-phase AD systems
- Training AI-based algorithms and agents in virtual environments
- Analyzing the working mechanisms of AI algorithms based on external stimulation
- Scenario-based validation of AD systems
- Advanced X-in-the-Loop systems / hybrid reality in order to bridge the sim-to-real gap

AD systems pose the formidable challenge of a human driver no longer being available as a backup to the automation system, and this is the major distinction between an automotive AD system (SAE Level ≥ 3) and other similar automation applications in transportation, e.g., autopilot systems in civilian aviation. Here, expert users in the form of the pilots are constantly monitoring the environment and the system. Furthermore, Air Traffic Control is also monitoring the airspace.

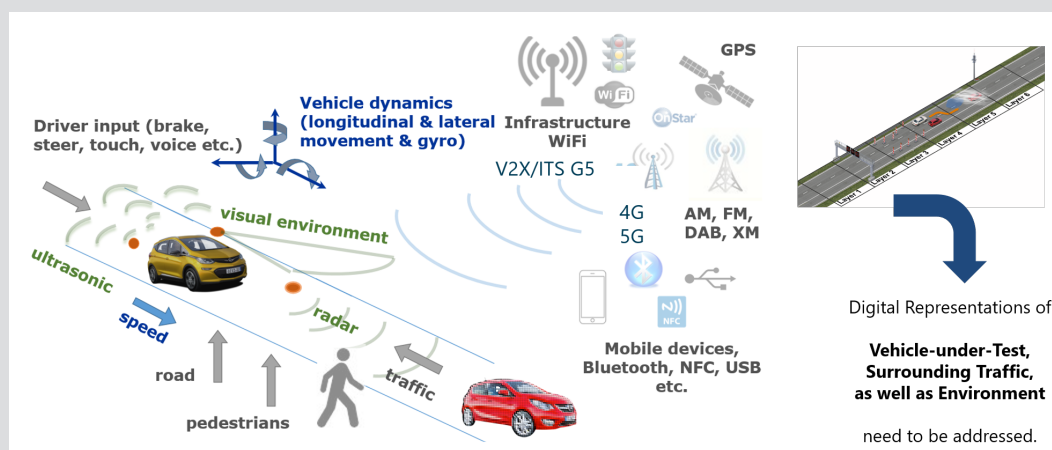


Figure 1.2: Digital twins and digital representations for virtual development and testing [2]

In terms of automotive applications, particularly in the urban environment, the technological challenge is the "open world" or "open-context", meaning it is neither sufficient nor even possible to work with a small, limited set of scenarios for the development and validation of the automated system.

There is a need to establish an approach for exploring the parameter space of the "unknown unknowns". As Figure 1.2 shows, this requires not only digital representations of the vehicle-under-test, but also the surrounding traffic and environment. Furthermore, a methodology benchmark needs to be identified. Projects within the PEGASUS family of projects decided to adopt the "GAMAB" principle, which means the new technology needs to be at least as good as the established technology. For the automotive community, that means that the AD system needs to be significantly better than an average human driver in a state-of-the-art modern car. Since humans only cause a severe accident every 12 million km on Germany's high-speed motorways for example, statistical considerations dictate that billions of km need to be driven to demonstrate a good performance level with a sufficient confidence level and test probability. In the urban context, the situational complexity is several orders of magnitude greater than on motorways. Finally, an automobile is a safety-critical system that could endanger occupants and other traffic participants if it is not properly designed and implemented.

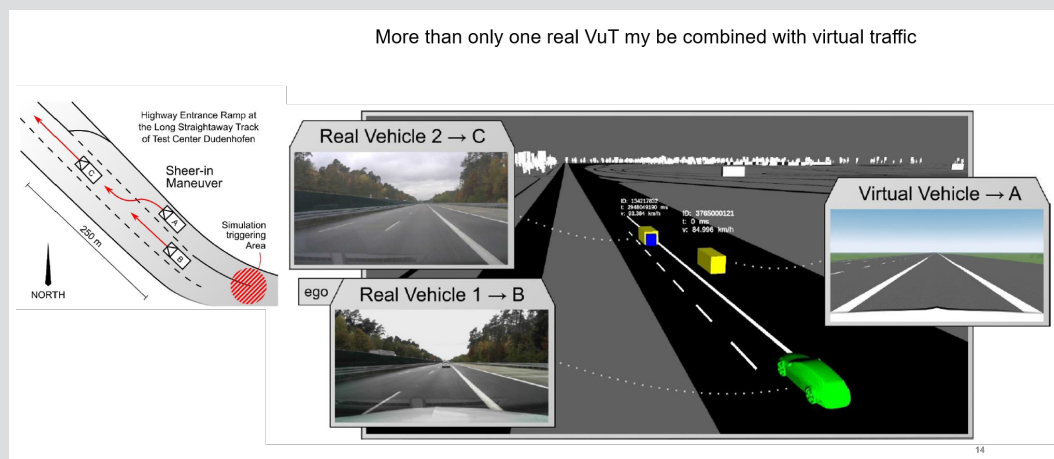
For this reason, it is not possible to test or train an early-stage AD algorithm on public roads. Rapid prototyping in a fully simulated environment is therefore of utmost importance and significance, since any flaws in the system will not harm the test driver in the vehicle-under-test or other traffic

participants. This holds especially true when cooperative and V2X features need to be investigated alongside automated functions. A cooperative feature such as cooperative highway merging takes place in a complex traffic environment and requires at least three cooperating vehicles and many more non-cooperating surrounding vehicles, as Figure 1.3 shows. Staging such an experiment by orchestrating test drivers is virtually impossible, not reproducible and, in terms of exploring system limits, also dangerous. For this reason, simulation-based approaches comprising multi-ego capability (i.e. several vehicles-under-test operating at the same point of time) and agent-based testing are key.

Similarly, using a pure real-world approach, it is impossible to responsibly train an AI algorithm (regardless of whether perception or path planning is considered, for example) since crashes will occur during the training stages and learning phases. This is of particular importance when self-supervised or even reinforcement learning AI algorithms are applied, which (by definition) learn from previous failures to achieve more mature stages. It could be assumed that first-stage training takes place in a fully virtual environment as shown in Figure 1.4 and moves up to the next stage of the "road to reality" when pre-defined performance and quality metrics have been attained.

A simulation environment can also be used to deliver external stimuli to a "black-box" neural network in a controlled and reproducible manner for the purpose of analysing the network's operational principles. This is particularly interesting since neural networks are often trained on and learn from data set characteristics that might not at first sight be apparent to a human analyst. By providing such external stimuli – from a traffic simulation,

Figure 1.3: Simulation and hybrid reality for developing and testing automated and cooperative features [3]



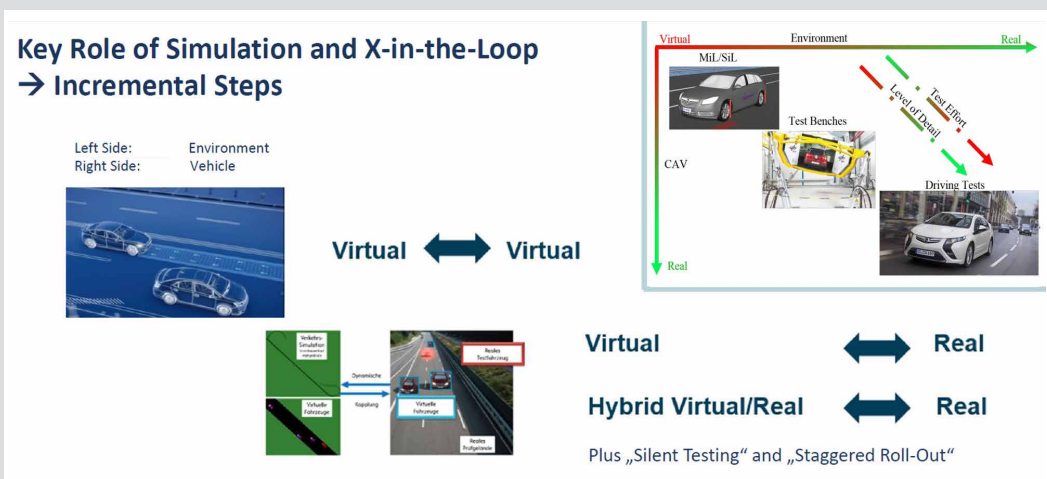


Figure 1.4: Incremental steps from MiL/SiL approaches over advanced Vehicle-in-the-Loop and Prototype-in-the-Loop/hybrid reality to public road operation [2]

for example – and by careful and controlled variation of the network combined with subsequent sophisticated analysis, valuable and highly relevant insights can be gained. By contrast, such a virtual environment could also be used to simulate adversarial attacks on an AI-based AD system in the controlled virtual environment. Doing so, and letting an adversarial agent compete against the AD module, could achieve a more robust final AI system.

The primary focus application of simulation-based approaches to automated driving involves validating a specific AD feature. Typically, there is a collection of simple scenarios from a process, such as an expert peer review or scenarios captured from real-world-driving, that are curated for use in a virtual environment. The commonality of both approaches is that they typically work using “scripted scenarios”, meaning that traffic participants are not independent agents, but follow scripted trajectories. This approach is an essential basis and has merit of demonstrating and measuring both the performance level of an AD system and reproducibility. To increase the long-term applicability of such scenarios, however, there is a need to transform the scripted traffic participants into independent agents capable of running in a long-term or higher-complexity scenario, such as approaching or emerging from a traffic jam, where the traffic is characterized by a large number of interacting traffic participants and the phenomena that result from these interactions.

Finally, simulation-based approaches will always address at least three distinctive parts

- Perception
- Path planning
- Vehicle dynamics

To reduce the complexity of the challenge of testing and tackling parameter space explosion, it is sometimes helpful to define procedures and tests that focus solely on a specific sub-field in a controlled manner. For example, full real-time physical sensor models are not required to test path planning and the actors/vehicles dynamics. Similarly, a full and highly realistic vehicle model is not required to test perception. Simulation-based approaches that exclusively address perception could, for example, augment existing data captured from real-world scenarios by inserting additional dynamic or static objects or by changing certain features of the specific scenario, such as brightness levels or other weather conditions. This is particularly important where the augmented scenario is not accessible from real-world driving since it occurs too infrequently to be captured or would be too dangerous to provoke.

Such focused simulations may be combined to form a systems approach based on the establishment of regions of interest based on sensor range. Within this region of interest, the world would be simulated in high fidelity, and outside this moving region or window around the vehicle-under-test, a computationally less demanding lower-fidelity tool could be used to simulate the environment, vehicle physics and agents. Since the operational im-

plementation and documentation are also of utmost important, a powerful parameter variation and test execution tool is an indispensable part of the complete toolchain.

To address the aforementioned challenges, a simulation-based toolchain for automated driving needs both to be highly modular and flexible and to cover different levels from MiL to hybrid reality approaches on a proving and even to real-world driving. It must also integrate scripted and agent-based scenarios or even a combination of both. Additionally, the toolchain should tackle the early phases of the development process as well as the late validation parts and should be compatible with all phases from MiL to Prototype-in-the-Loop/hybrid reality by applying shared definitions, metrics, simulation models and scenario libraries. Our approach to using an open and modular approach to achieve these targets is described in the following chapters.

1.3 Framework

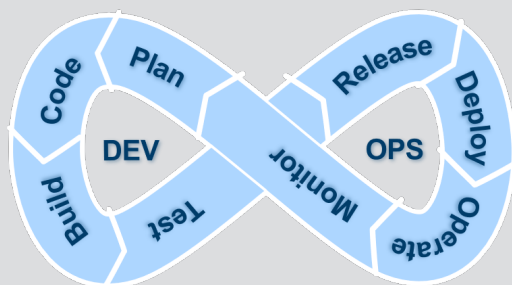
Simulation has become an important and powerful tool with a high degree of relevance to a wide range of engineering tasks, ranging from the identification of first ideas and requirement elicitation through to final testing and assessment. During the systems operation and maintenance phases, simulation can also serve as a tool for improving our understanding of abnormal or non-normative situations, for example, and deriving as well as assessing mitigative actions or functional improvements. The DevOps idea and related processes cover, among other things, these tasks and phases. In general, the entire product lifecycle is covered (cf. Figure 1.5). DevOps integrates activities from systems design and development with sys-

tems operation, the general intention being to reduce the time needed to develop the system and ensure high system quality while providing continuous delivery based on field data and experience. While DevOps has its roots in IT systems and software development, it is now used in other areas, including the automotive industry.

The main phases of the DevOps cycle are briefly described below:

- Plan – Collect and precisely describe requirements, define the architecture and other aspects relevant to the implementation/construction of the system and its release.
- Code (= implement or construct) – Implement and/or construct the component parts of the system.
- Build – Integrate the various components and build the system
- Test – The system undergoes testing (over and above the continuous testing conducted during previous phases and, in particular, end-of-line tests).
- Release – The system is available for deployment, all relevant key performance indicators (KPIs) have been adequately fulfilled.
- Deploy – The system/product can be made available and deployed for customer use.
- Operate – The system/product is observed during use by customers. Further KPI compliance can be verified during operation using field data.
- Monitor – The long-term performance of the system/product can be monitored during operation. The findings from this phase indicate where improvements or new features are needed. Improvements to system production itself can also be identified (by means of new or extended test-catalogues or adapting KPIs to incorporate customers' justifiable environmental needs).

Figure 1.5:
Phases typically covered by the Development Operations (DevOps) cycle



1.3.1 Open testing architecture

An open testing architecture (OTA), see Figure 1.6, was briefly proposed by Koester et al. in the ASAM SIM:Guide [4] and shortly after that at the SETLevel interim event [5]. An OTA consists of generic

components and assumes a high level of standardization for components and their connecting interfaces. Utilizing standardized components, interfaces, data structures and architectural design ensures a quality standard that is based on a consensus between participating players, such as OEMs, TIER1s, etc. Furthermore, this way of designing the OTA ensures flexibility, configurability and exchangeability. This seems to be what is missing when user demand at this point in time is analysed. Moreover, the code, control algorithms and perception modules inside the standardized components can be kept private and thus remain the intellectual property of the developer. This ensures flexibility while still delivering an agreed overall standardized framework.

The OTA resembles a bus system where various components communicate with each other in a predefined manner. Bus systems connect a variety of components that serve different purposes and enable them work together through a standardized, interface-based form of communication. Like a bus system that amalgamates electronic control units (ECUs) into a fully functioning end-to-end system, the OTA connects components that possess a broader variety than just ECUs, such as simulation models, operational environment descriptions, entire test descriptions, etc.

Configuration management serves as a continuous approach to set up the individual components while providing an overall configuration op-

tion that can be monitored and, if required, reconfigured at any time. This scheme is based on the **standardized architecture**, which predefines both the minimum and the essential setup options and additionally limits the possible configurations to a certain extent, depending on the components chosen.

A **standardized architecture** provides several advantages, including a limit on the minimum number of configurable components that does not restrict the complexity of the components themselves, yielding a finite set of components that should be sufficient for the intended aim. In addition, standards-based architecture necessitates standardized communication between components. The communication system, which consists of **standardized interfaces & data structures** serves to ensure proper communication between components and provides a further necessary standard for setting up each individual component with respect to their interfaces and data structures. Thus, the entire OTA communicates in a predefined standardized way and utilizes data structures which are composed in the same manner.

The **specify (test)** component embeds test descriptions, test specifications, pass/fail criteria, etc. In general terms, this component is necessary to ensure that the overall test modalities and parameters are predefined and provides input for further components of the entire OTA.

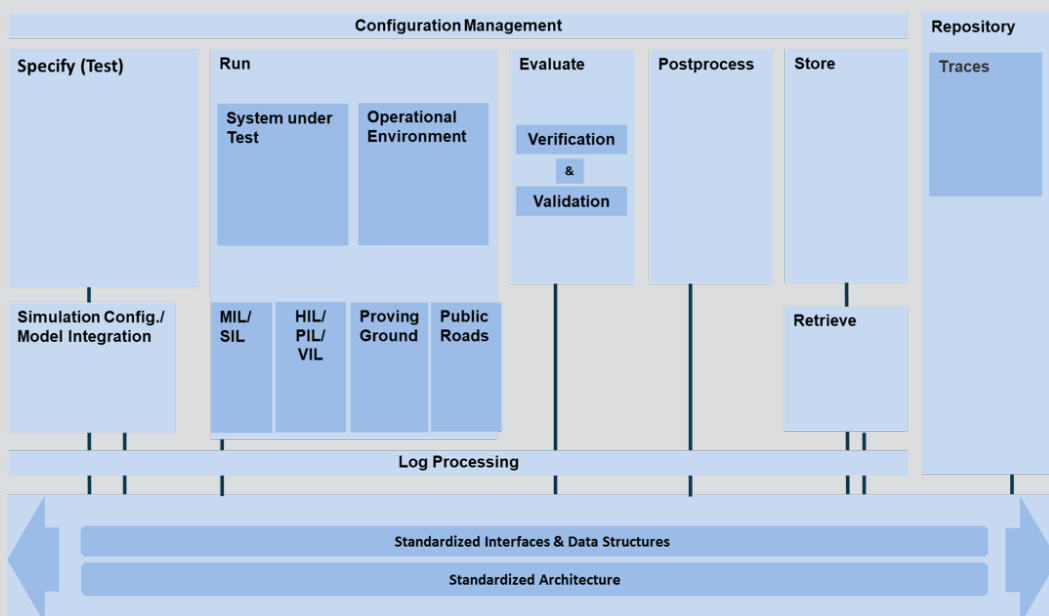


Figure 1.6: Generic open testing architecture (OTA) [4]

The **simulation configuration/model integration** component integrates the pre-configuration of the run component. Setting up the simulation-run environment requires basic simulation configurations, such as simulation time management, required observers, choice of numerical solvers, etc., model integration, model coupling and parameter selection. It can be beneficial to utilize more than one simulation tool to take advantage of a variety of specialized simulation tools simultaneously. For example, the advantage of using a vehicle dynamics and traffic simulation as a co-simulation has already been demonstrated in [6], [7] and [8]. Both the effects and artefacts of model and tool coupling need particularly intensive investigation and diligence because the numerical errors and logical fallacies are not always trivial and easy to identify. Additionally, the hardware setup needs to be configured within this component. This applies to solely virtual MiL/SiL setups as well as to Hardware-in-the-Loop (HiL)/Prototype-in-the-Loop (PiL)/Vehicle-in-the-Loop (ViL) hybrid reality methods and even real-world testing on proving grounds or public roads.

The core of the entire OTA is the **run** component, which compiles and processes the tests. For this reason, the run component requires several sub-components within itself in order to operate properly. First, the system under test (SUT), also known as the CAV, or a sub-component such as an AI-based perception module, for example, are incorporated. Furthermore, the operational environment within which the SUT is supposed to operate is the second sub-component within the run component.

These sub-components are necessary for all testing methods and deployment procedures. The configuration of the SUT with respect to the operational environment itself is especially important. When specifying a test, the question of the context or overall system in which the SUT needs to be tested arises. Thus, the SUT can vary from a single component or entire system, such as a CAV, up to a traffic system or entire city. Likewise, the operational environment in which the SUT is tested can be described as anything from a single component to an entire traffic system. The OTA allows extensive freedom in setting up the SUT and operational environment, subject to the proviso that both need to be specified for the run component to operate. Additionally, the hardware for the necessary calculations needs to be factored into and specified in this component. For virtual

methods, such as MiL/SiL the hardware setup accounts for computational power and maybe a distribution over several specialized computation clusters. In terms of test methods that are no longer solely virtual, the OTA provides the option of incorporating HiL/PiL/ViL approaches up to proving ground and public road testing. Of course, the considerations for these approaches in terms of computing power and hardware differ from purely virtual testing. Nevertheless, hardware design is an important part of the run component and needs to be carried out with diligence.

Test evaluation and analysis takes place in the **evaluate** component, the purpose of which is self-explanatory. Metrics, functional and non-functional requirements as well as pass/fail criteria are calculated within this component. Additionally, the component can estimate the accuracy of models and solvers as well as cumulative failures during the simulation run. Thus, the component provides vital information on overall test integrity by performing an accuracy and validity assessment.

In order to reduce computation time, the **post-process** component makes it possible to calculate deduced test criteria and metrics on the basis of a variety of measured signals. While this step could also be conducted in the evaluation component, the more complex it becomes to calculate certain metrics, the greater the preferability of doing so once the test has been completed.

The **repository** provides the an option for permanently storing such things as specific or overall OTA configurations, models, data, calculated test results and setups. As such, it serves as an overall storage unit for the entire OTA.

Repository access and data storage are managed by the **Store** and **Retrieve** components, respectively. These components can also process complex queries.

Every bus system requires simple data logging function that is connected to all the other components in the system. For this reason, a **log processing** component is embedded in the OTA.

An overview of relevant standards for the OTA and a more compact description can be found in the ASAM Guide: Simulation [4].

1.3.2 Automated configuration/set-up

It is important to note that the configuration and set-up of the OTA and, consequently, every other future testing procedure cannot be done manually, simply because of the huge effort involved in CAV testing in general. Automated configuration can help a lot by standardizing the entire OTA, interfaces, data structures and overall component configuration. While this may be a challenge and additional source of work at the outset, it will become a key enabler in the long run. Recent CAV testing initiatives have shown repeatedly that using short cuts to configure and set up testing procedures in the first place is a game changer when the long-term overall release of CAV safety is seriously pursued. Thus, the additional time and investment that need to be spent at the outset will prove to be of considerable value in the long run.

The issue of what exactly automated configuration/setup means remains a little blurry along the edges because of the many nuances in testing procedures, architectures, components, etc. The authors would now like to illustrate some aspects of this topic as a way of providing suggestions for setting up future testing architectures and procedures. There needs to be a formal and standardized way of setting up components and their interfaces to permit automated configuration. The basic structure should be predetermined, while the interfaces and data structures for communication with other components are already specified by the OTA bus system. The incorporation of code, simulation models and parameters can be defined by the developer himself within the basic framework provided by the predetermined structure. This makes it possible to utilize a variety of simulation models, parameter configurations, etc. that are tailored to developers' demands while still guaranteeing automated configuration/setup that is compatible as "simulation as a service".

1.3.3 Simulation as a service (SAAS)

The SAAS supported and enabled by the OTA affords the option of utilizing components as well as tools across domains that are supplier-neutral. It is thus possible to combine a multitude of commercially available simulation tools, models, evaluation metrics and test specifications from different suppliers in such a way as to take advantage of free market principals. The days where suppliers offered one end-to-end solution for all problems are definitely over. Nowadays, different solutions have

to collaborate and the component exchangeability is needed, which manifests itself in a dominant mode of thought and a generally preferred engineering design principal for CAV testing.

All in all, SAAS will shape future development, test and validation procedures for both AI components and CAVs. Current engineering design principals, which are already outdated for this engineering task, will be gradually replaced by "as a service" approaches, and these will shape the future of complex testing procedures.

1.4 Engineering tasks

The proposed OTA allows for a diverse range of different engineering tasks in the field of CAV and AI testing. To keep this section sufficiently brief, the authors will focus on the following example engineering tasks, while noting that these do not indicate any restriction of applicability. Thus, the OTA supports the entire spectrum of CAV and AI testing.

The engineering task of identifying critical scenarios [6], which can be regarded as a sub-set of scenario mining, is a well investigated task that relies quite heavily on simulation. The main challenge of these approaches is to mine scenarios in the light of a predefined metric that reflects requirements that determine which scenarios should be identified. Criticality parameters are primarily used to mine challenging scenarios that are subsequently used in testing in the validation phase of a CAV or AI component. The scenario mining schemes are usually set up in a unique fashion based on a commercial simulation tool. While this way of development is obviously outdated, the issue can be resolved using the OTA. The advantage of using various components, models and tools in a standardized architecture is that it maximizes independence and exchangeability. Even the metrics that are of vital importance for these methods can be exchanged easily. The same applies to tools and models, as well as to parameter sets, which change frequently during testing.

Furthermore, the search for "corner cases" and their safety-related role is another important engineering task that is considered here. Work on investigating corner cases focuses on the limits of the known parameter spaces, on the corners of extreme circumstances that do not often occur. The purpose of the tests that are performed is to generate knowledge about the extreme limits of the parameter spaces. This is another area where

the flexibility of the OTA can be exploited. In this case, the exchangeability of models is important, because the validity of the simulation models is deliberately directed to the edges of parameter spaces in order to permit corner case testing.

Direct access to the repository of critical scenarios provides a starting point for further investigation. The OTA makes it possible to exchange, use and reuse critical scenarios for different test environments, such as MIL, SIL, HIL, etc. Thus, the OTA provides a flexible way of incorporating these test environments and utilizing them across various engineering tasks. In the case of corner cases, combining the OTA with a testing procedure can direct testing activities towards a predefined metric, for example, criticality indicators such as TTC. If required, the test environment can be exchanged to improve test validity by using HiL/PiL or even tests conducted on a proving ground up to data gathered on public roads.

This exemplifies how the OTA supports engineering tasks and deployment procedures and offers a novel approach to using automatically configured SAAS schemes to test AI components and CAVs.

1.5 Simulation-enabled testing and deployment procedures

Considering the entire spectrum of testing and deployment procedures that simulation enables, ranging from purely virtual procedures to tests on public roads, a number of important characteristics and differentiating factors need to be addressed. It is not necessarily the case that a test on a proving ground is more valid than a simulation or vice versa. Depending on the measurement equipment available at a proving ground, inaccuracies arise. Furthermore, it is often claimed that simulation is cheaper and more efficient than real-world testing. This is also debatable, given the computing power required to model the entire world accurately in a simulation run. However, the claim that virtual testing requires less effort holds to some degree. Its validity rises when the procedure tends towards real-world testing by design using, for example, HiL/PiL/ViL. Conversely, this does not mean aiming for perfection when using virtual methods, but introducing more real-world elements into the testing procedures rather than constantly increasing the quality and complexity of the simulation models. This is in line with the idea that simulation results should be valid enough for the engineering task in question.

If greater quality and precision are needed, mixed and hybrid-reality procedures come into play. These procedures use real components and confront them with virtual stimuli. For example, a real-world CAV is driving on a proving ground while the other test participants are simulated. The sensor object-list can be overwritten to deceive the CAV into assuming that other participants are performing driving manoeuvres nearby, and the CAV reacts accordingly. This is an alternative to proving ground tests utilizing other test vehicles and possesses many advantages, including test reproducibility, damage mitigation when testing critical scenarios, etc.

Introducing real-world test vehicles on a proving ground can be considered the next step towards real-world testing. Nevertheless, the fact that the tests are performed in a confined space constitutes a simplification even though all of the test participants – including the test environment – are real-world objects. The test results are error-prone due to measurement inaccuracies. Even if an independent monitoring system is installed, measurement precision increases but cannot be mitigated entirely.

The same can be argued for tests conducted on public roads. In this case, there is no longer any simplification compared to virtual and hybrid reality procedures or proving ground tests. The real bottleneck for public road testing is the monitoring system, which relies on a variety of sensor perceptions, making the measurement inaccuracies a difficult challenge to overcome. Monitoring systems rely on various sensors simultaneously to increase measurement integrity and minimize errors, such as misclassifications.

As a framework, the OTA's run component provides all the above-mentioned testing and deployment procedures summarized for virtual testing SIL/MIL, mixed and hybrid reality approaches HiL/PiL/ViL as well as proving ground and public road testing.

1.5.1 Parameter variation

Parameter variation is vital for comprehensive testing. For this reason, the OTA predefines the SUT and operational environment as key aspects within the run component. It is important to notice that the parameter variation described in this section is intended for test design and thus not for numerical precision nor the non-design parameters that are embedded in the simulation models

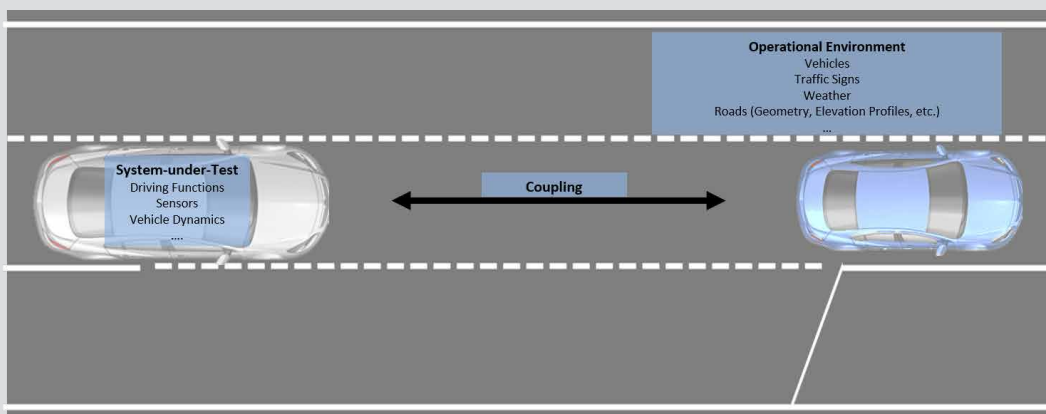


Figure 1.7: Parameters of a CAV (system under test, SUT) driving on a highway (operational environment)

for validity reasons. The parameters described are therefore designed to create a variety of circumstances which create systematic tests for CAVs and AI components. Figure 1.7 shows the SUT and the operational environment, including parameterizable examples.

In this example, the SUT is defined as a CAV driving on a highway representing the operational environment. Note that this configuration can be entirely different, as mentioned before, but this example is being used in this case to explain the aspects of this section. The CAV in this example consists of driving functions, sensors and vehicle dynamics. This represents the minimum set needed to model a CAV. The operational environment contains static components, such as roads, road markings and traffic signs, as well as dynamic components, such as vehicles and weather conditions, to name but a few. All of these components can be parameterized within a certain bandwidth. The parameters can be static, a part of a model and therefore described as a differential equation or as an automaton.

Tests can be generated through specific variation of these parameters. Now the basic principle of parameter variation has been clarified, the specifics and details for these examples can be discussed. In addition, questions arise if the non-design parameters are varied as well and what kind of effects are anticipated and if the design parameters

can be decoupled from non-design parameters in all cases.

To keep this section brief, further examples and engineering tasks will not be added.

1.5.2 Cooperative and automated vehicle (CAV)

Given the parameters of a CAV, it seems reasonable to separate the design parameters from the non-design parameters. It should be noted that the non-design parameters, such as vehicle mass and center of gravity, can be very well design parameters in the general vehicle development process, but not when focusing on testing of CAV driving functions. These so-called non design parameters play a vital role in determining simulation model quality and need to be generally considered while designing a motion control algorithm, for example. As regards test generation, the more interesting design parameters are those used to make driving strategy decisions, fuse the sensor perceptions or control vehicle motion. Figure 1.8 shows a CAV with example design and non-design parameters.

CAV design parameters exist along the sense-plan-act robotic paradigm, an established paradigm in CAV development. Parameters can be varied in a multitude of dimensions throughout the paradigm. The challenge to be overcome emerges in the development of methodologies on how to vary parameters purposefully and effectively. The



Figure 1.8: Example design and non-design parameters of a CAV

controller parameters, for example, directly influence the motion of the CAV, resulting in a more aggressive or defensive elimination of the control difference based on the reference value provided by the trajectory planner. Changing these parameters has a direct effect on safety while simultaneously influencing other requirements, such as energy efficiency, driving comfort, etc. Joint efforts to resolve these issues can be found in the PEGASUS family initiative [9], [10], [11] and published research papers [12], [13], [14] and [15], to name but a few sources for the interested reader.

At all events, the OTA provides the option of incorporating yet undeveloped methodologies in the illustrated components. The OTA's bus system-like configuration makes it possible to enhance further OTA components that might be required once these methodologies have been developed and agreed.

1.5.3 Operational environment

Parameters for test generation are mostly dependent on the domain the SUT is supposed to operate in, also known as the operational environment. It is not a trivial task to describe the operational environment systematically in all its complexity. Researchers within the PEGASUS family initiative designed a six-layer model categorizing a vertical layer structure comprising layer 1 (road networks), layer 2 (roadside structures), layer 3 (temporary modifications of L1 and L2), layer 4 (dynamic objects), layer 5 (environmental conditions), layer 6 (digital information) [16]. Within this structure, parameters can be assigned and varied within a predefined structure and categorization. Considering the OTA, this model can be used as a guideline for setting up the operational environment and clustering parameters.

The 6-layer model currently addresses AI-specific features that could be added to enhance the operational environment description. The AI-specific features mostly focus on perception, and for this reason, the model should be enhanced by adding sensor-specific aspects as well as reflecting object properties that affect sensor impressions. Sensor

characteristics are difficult to model using simulation approaches while, unfortunately, perception failures are one of the major causes of critical scenarios. Since perception is the first part of the sense-plan-act paradigm, errors made at the start of the chain are difficult to eliminate later on.

An additional challenge, especially for simulation-based approaches, is going to be the validation of the digital twin of the operational environment. A lot of effort is going into developing the perfect sensor models for standard camera, radar and lidar sensors, but the digital world and all the reflections of the objects in the environment must be modelled as well in order to obtain an accurate sensor impression. This task is even more difficult than sensor modelling itself and needs further investigation in subsequent research.

However, the issues of how significant the criticality parameters are and how the deduction of critical scenarios as well as criticality parameter regions can be identified in an efficient and practical manner are still subject of current research. Most current approaches lack practicability, or to put it in more directly terms, current proposed methodologies still have to withstand the credibility test best summed up by saying the tyre needs to hit the road at some point. In other words, theoretical considerations need to be applicable and practicable.

Whatever methodology, or, as is more likely, set of methodologies prevail, the OTA can provide a framework consisting of every necessary simulation-enabled testing and deployment procedure. Thus, there are no enforced restrictions on methodologies and approaches. Because of the generic setup, the OTA supports the application of all methodologies that are developed for future testing.

1.6 Summary and outlook

The application landscape for simulation-enabled development, test and validation methods appears to be continuing to grow. It is noticeable that this growth seems to be accelerating over time, indicating that demand for these methodologies is more likely to increase in the future. That is why these methods require sophisticated frameworks and architectures to handle the complexity that in-

trinsically arises when focusing on the development, testing and validation of applications, such as cooperative and automated driving and AI components.

In recent years the DevOps cycle has gained increasing popularity among the engineering community working on the above-mentioned applications. This can be attributed to this framework's advantage in covering the entire product lifecycle. Moreover, it makes updates and functional improvements to systems that have been released and are in use feasible.

Within this framework, simulation needs a generic architecture that permits exchangeability and standardized components and interfaces. The OTA provides this in a bus system-like setup. This architecture allows for SAAS procedures while permitting automated configuration of both individual components and the entire architecture.

The possibility of tackling a large variety of engineering tasks, such as identifying critical scenarios, as well as simulation-enabled testing and deployment procedures such as systematic parameter variations, gives the OTA a major advantage when combined with existing simulation-based methods and procedures.

The aspects presented in this article are key areas for future research and refinement. Further investigations of applicability to various engineering tasks in practice need to be carried out. It is going to be interesting to see which engineering tasks will be challenged utilizing these procedures, methods and tools.

The authors conclude by emphasizing the importance of standardization in this field, since a high level of standardization is crucial to satisfying the requirements outlined in this article.

Bibliography

- [1] F. Koester and S. Rude, SET Level Mid-term Event – Introduction and Challenges, Munich: SETLevel Mid-term Event, 2021.
- [2] U. Eberle, S. Hallerbach, R. Mannale, B. Kramer, C. Neurohr, M. Steimle and C. Amersbach, The Pegasus Method for Safeguarding Automated Driving: What else is needed?, Wolfsburg: Pegasus Final Event and Symposium, 2019.
- [3] V. Lizenberg, B. Buechs, S. Knapp, R. Mannale and F. Koester, Graphical Data Visualization for Vehicular Communication Systems in Real and Virtual Test Environments, Dortmund: AmE (Automotive meets Electronics), 2020.
- [4] F. Koester, S. Hallerbach, P. Mai and B. Engel, "ASAM OpenX in Context," *ASAM SIM:Guide – Standardization for Highly Automated Driving*, pp. 38-49, 2021.
- [5] F. Koester, S. Rude and S. Hallerbach, Methodologies for Simulation-Based Engineering Tasks – Towards a SET Level Methodology, Munich: SETLevel Mid-term Event, 2021.
- [6] S. Hallerbach, Dissertation: Simulation-Based Testing of Cooperative and Automated Vehicles, Oldenburg, 2020.
- [7] S. Hallerbach, Y. Xia, U. Eberle and F. Koester, "Simulation-Based Identification of Critical Scenarios for Cooperative and Automated Vehicles," *SAE International Journal of Connected and Automated Vehicles 1(2)*, p. 93–106, 2018.
- [8] S. Hallerbach and U. Eberle, "Simulation-based Methods for Development, Test and Validation of Automated Driving: Scenarios, Smart Agents and Hybrid Reality," SATW Workshop "Connected and Automated Driving: In-vehicle and Deployment, Swiss Academy of Sciences, Zurich, 2020.
- [9] PEGASUS-Family, "PEGASUS RESEARCH PROJECT – SECURING AUTOMATED DRIVING EFFECTIVELY," [Online]. Available: <https://www.pegasusprojekt.de/>. [Accessed 13/08/2021].
- [10] PEGASUS-Family, "Verification and validation methods for automated vehicles in urban environments – Safety standards for automated driving," [Online]. Available: <https://www.vvm-projekt.de/>. [Accessed 13/08/2021].
- [11] PEGASUS-Family, "SETLevel – Simulation-based Development and Testing of Automated Driving," [Online]. Available: <https://setlevel.de/>. [Accessed 13/08/2021].
- [12] C. Neurohr, L. Westhofen, H. Tabea, G. d. Thies, E. Moehlmann and E. Boede, "Fundamental Considerations around Scenario-Based Testing for Automated Driving," *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, pp. 121-127, 2020.
- [13] V. Lizenberg, D. Bischoff, Y. Haridy, U. Eberle, S. Knapp and F. Koester, "Simulation-Based Evaluation of Cooperative Maneuver Coordination and Its Impact on Traffic Quality," *SAE Technical Papers (01):0171*, 2021.
- [14] B. Schuett, M. Steimle, B. Kramer, D. Behnecke and E. Sax, "A taxonomy for quality in simulation-based development and testing of automated driving systems," Preprint, 2021.
- [15] N. Weber, D. Frerichs and U. Eberle, A simulation-based, statistical approach for the derivation of concrete scenarios for the release of highly automated driving functions, Dortmund, AmE (Automotive meets Electronics), 2020.
- [16] M. Scholtes, L. Westhofen, L. Turner, K. Lotto, M. Schuldes, H. Weber, N. Wagener, C. Neurohr, M. Bollmann, F. Koertke, J. Hiller, M. Hoss, J. Bock and L. Eckstein, "6-Layer Model for a StructuredDescription and Categorization of UrbanTraffic and Environment," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 59131-59147, 2021.

Simulation of Abstract Scenarios: Towards Automated Tooling in Criticality Analysis

Jan Steffen Becker
Tjark Koopmann
Birte Kramer
Christian Neurohr
Lukas Westhofen
Boris Wirtz
Eckard Böde
Werner Damm

Abstract. While the introduction of automated vehicles to public roads promises to benefit the environment, economy and society in various ways, reliable verification & validation processes that will guarantee automated vehicles operate safely are the subject of ongoing research. As automated vehicles are safety-critical complex systems that operate in an open context, the uncountable infinite set of potentially critical situations renders traditional, distance-based approaches to verification and validation unfeasible. Leveraging the power of abstraction, current scenario-based approaches aim to reduce this com-

plexity by eliciting representative scenario classes while simultaneously shifting significant analysis and testing efforts to virtual environments.

In this work we bridge the gap between high-level, abstract scenario specifications and state-of-the-art detailed vehicle and traffic simulators. While the first allow for coverage argumentation by defining finite and easily managed sets of scenario classes, the latter is necessary for an in-depth assessment of vehicle implementation and interaction with the physical environment. We present a method and prototypical implementation based on constraint-solving techniques to generate (sets of) concrete simulation tasks defined in the firmly established OpenDRIVE/OpenSCENARIO formats from abstract scenarios specified as Traffic Sequence Charts. Feasibility is demonstrated using a highway parallel overtaking scenario as a running example.

1. Introduction

Automotive technology is evolving constantly, aiming to make driving safer and more comfortable. The development of automated vehicles (AVs) aspires to achieve improvements on both fronts by completely taking over the driving task. Establishing a reliable verification and validation (V&V) process that guarantees the safe operation of these AVs is a tremendous task and may be even more complex than the original development process. Since AVs are safety-critical complex systems that operate in an open context, the core of this challenge lies with limitations of the perception task and in the associated task of building up an internal model of the environment. This model must not only contain representations of all relevant physical objects surrounding the AV, but also requires correct classification of object types as well as trajectory predictions for traffic participants. This leads to the dilemma of completeness, i.e. AVs need to be designed, verified and validated to exhibit the intended behaviour for uncountably many potentially safety-relevant situations and scenarios. In order to establish a robust and trustworthy V&V process, it is necessary to find a way to map this infinite set onto a finite set of artifacts so that it becomes possible to demonstrate that the AV will behave safely in for all of them as long as the constraints set for the respective category hold. The V&V problem becomes even more pronounced in light of the machine learning-based components that support AVs' perception task. Thus, we need new testing strategies.

The scenario-based approach, which aims to reduce this complexity by eliciting representative scenario classes [1] [2], has been popularized by projects such as PEGASUS¹ and ENABLE-S3². The follow-up projects VVMethods³ and SET Level⁴ consolidate and extend these results for higher levels of automation and to more involved traffic environments. Within VVMethods, a methodical Criticality Analysis [3] has been proposed to tackle the issue of completeness while maintaining artifact manageability. This requirement necessitates a high level of abstraction for the description of scenario classes. A main goal of VVMethods and SET Level is to develop and qualify virtual analysis and testing environments and supporting processes that make it possible to integrate assessment results for AVs and AV components along both arms of the V model.

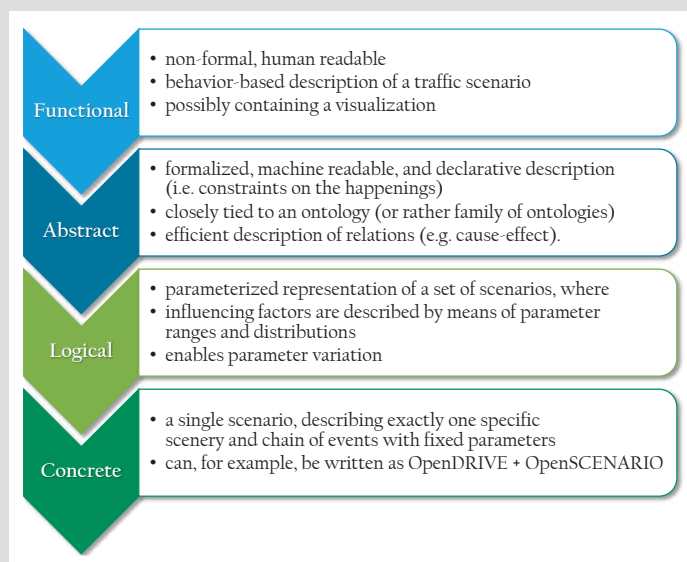


Figure 1: Characteristics of the abstraction levels of scenario description from [3], based on [7].

In this chapter, we present a method that relies on the formalism of Traffic Sequence Charts to represent abstract scenarios and uses constraint-solving techniques to obtain a satisfying trajectory within the world model. Mapping this trajectory onto the standardized scenario specification formats OpenDRIVE [4] and OpenSCENARIO [5] enables abstract scenario execution in state-of-the-art simulation environments. The feasibility of the proposed method is demonstrated by using a prototype implementation to specify and evaluate a parallel overtaking scenario on a highway.

2. Background

This section briefly introduces some background to the contents of section 3 and section 4. In particular, it discusses scenario specification languages, traffic sequence charts and the relevant associated literature.

2.1 Scenario specification languages

A scenario, as proposed by Ulbrich et al. [6], describes the temporal development between several scenes, where a scene is a snapshot of the environment, including scenery and dynamic ele-

ments, in a sequence of scenes. In general, scenarios can be described at different levels of abstraction that are relevant to different stages in the V&V process. Menzel et al. [7] introduced the well-known functional, logical and concrete scenarios that are used during the concept phase, system implementation and testing respectively. A

brief summary of their characteristics is given in Figure 1. However, as these levels did not quite meet the requirements elicited by the VVMethods Criticality Analysis, Neurohr et al. [3] used abstract scenarios as formalized, declarative descriptions of traffic scenarios focusing on complex relations, which are located between functional and logical scenarios in terms of their level of abstraction. This further category of scenario classes should permit the creation of human- and machine-readable scenario catalogues and enable argumentation about coverage. Moreover, abstract scenarios focus on complex relations within traffic, especially cause-and-effect relationships, and facilitate scenario branching. These requirements are not covered by the above-mentioned scenarios since functional scenarios lack well-defined semantics and machine interpretability, while logical scenarios, given their imperative nature, can hardly be used to describe complex relations, branching or variation over objects and spaces.

¹ pegasusprojekt.de/en/

² enable-s3.eu/

³ vm-projekt.de/en

⁴ setlevel.de/en

Adequately describing abstract scenarios requires a declarative specification language that formalizes knowledge using constraints interpreted over a domain model. In this regard, Traffic Sequence Charts, which will be introduced in subsection 2.2, present an effectively formalized, accessible, easy-to-use, and expressive language option with which to represent and, finally, enable the specification of abstract scenarios.

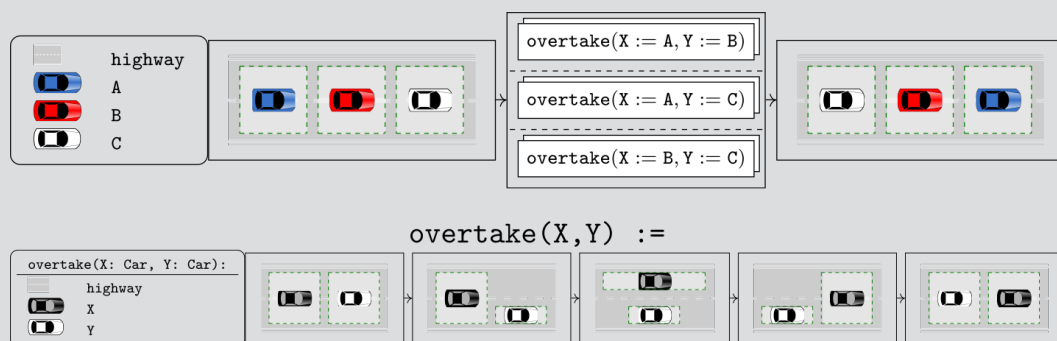
2.2 Introduction to Traffic Sequence Charts

Although the formalisms of Traffic Sequence Charts (TSCs) and their properties have been the subject of several publications, cf. [8], [9], [10], we will give a concise introduction here as a means of providing context. The formalism underlying TSCs is based on acyclic graphs of chart nodes. Chart nodes capture constraints over a time interval and can be combined to form a chart using sequence, choice or parallel composition. In a chart, the constrained time intervals are seamless, i.e. there is no time gap within a sequence of two nodes. Chart nodes include simple invariants (constraints that hold throughout the complete constrained time interval) and conditions (constraints that hold at least once), and complex nodes specifying communication/event patterns or containing complete charts. Spatial views describe spatial constraints between objects, represented by symbols in a topological view. Spatial views can be used as base constraints for invariant and condition nodes. The domain model that underlies a TSC is defined in a so-called world model, and linked to the visual formalism by the symbol dictionary. Throughout this chapter, the “parallel overtake” TSC depicted by Figure 2 will serve as a running example. It should be noted that the formalism of TSCs has been designed to address the specific challenges in the V&V of AVs, in particular demonstrating the completeness of scenario catalogues as well as the composability of specifications that permit easy updates and extensions when design changes are made or when real-world data becomes

available. When considering logical scenarios, every action and object that is not included in the description of the logical scenario can never be present in concretizations derived from that scenario. By contrast, every abstract scenario is merely a restriction of some aspects of the underlying world model and any logical or concrete scenarios derived will contain some concrete realization of each aspect, including unspecified objects or actions, which leaves room for a much broader variety of derivable scenarios.

Going into some detail, the “parallel overtake” example involves three vehicles, where the blue and red vehicle both overtake the white car and the blue car also overtakes the red car. However, the order in which these overtakes happen is not specified. In our running example, the world model consists of a concept `TwoLaneRoad` and a concept `PassengerCar` that models vehicles traveling at a moderate speed of between 80 and 120km/h. Anyone interested in the difference in terms of some notion of criticality when an ego vehicle is in a situation as depicted for the red vehicle in the second box with the possible actions denoted in the third box and the aim is to overtake the white vehicle, might conclude that it is sufficient to model this as a logical scenario. However, even covering subsets of this parallel overtake using logical scenarios would require very elaborate, parametrizable models and would still leave a non-trivial question about the coverage of all possible concrete realizations of the scenario in Figure 2 unanswered. For this reason, this paper introduces the approach of using abstract scenarios in the form of TSCs to derive concrete scenarios by applying constraint-solving methods. The physical behaviour of the actors still has to be considered, but will be abstractly represented within the world model. Because they are declarative in nature, one of the major benefits of TSCs is their modularity, which provides a fairly simple framework for combining constraint systems to formu-

Figure 2: Running example: «parallel overtake» TSC (top) with definition of overtake below.



late increasingly complex scenarios. Every abstract scenario, including the aforementioned overtake, can be covered by a single TSC and, owing to the additional structure provided by TSCs, expressed as a system of constraints. The use of constraint solving-based methods for scenario discovery, especially with regard to coverage, is still a topic of wide discussion within the industry and will therefore be dealt with in future work. Some first results in this direction involving TSCs can be found in [10].

2.3 Related work

Abstract scenario description languages: The scientific and industrial community has already identified the need to produce formal representations of abstract scenarios [3]. At present, Measurable Scenario Description Language (M-SDL)⁵ and the accompanying efforts to standardize it within ASAM OpenSCENARIO 2.0⁶ offer approaches to defining a constraint-based language for traffic scenarios. Another approach by Bock et al. [11] suggests a controlled natural language format for specifying abstract scenarios in a prototypical implementation of the stiEF concept [12].

Although, traffic situations, which can be compared to scenes enriched by the actors' intentions [6], are not scenarios, let us nevertheless mention here the System Co-Design for Open Context Analysis (SCODE) method introduced by Rittel et al. [13]. They use what are termed zone graphs to describe abstract classes of traffic situations by generalizing concrete road geometries and objects. The SOCA method achieves coverage of a

large number of situations by discrete representation of the intended path of the vehicle under consideration.

Simulation of abstract scenarios: Formal scenario descriptions make it possible to perform a multitude of analyses, e.g. deriving concrete scenarios from the abstract constraints. Related work proposes initial solutions for doing so on the basis of non-linear satisfiability solving [14], [15] and mixed-integer quadratic optimization [16]. Furthermore, generating OpenDRIVE and OpenSCENARIO files on the basis of formalized ontologies has also been examined [17].

Compared to the abstract scenario languages used in the works cited above, TSCs provide rich temporal specifications, which are comparable to classical temporal logics for real-time and hybrid systems, in particular Interval Logic (IL) and Duration Calculus (DC) [18]. Several methods have been developed for satisfiability checking of IL and DC, which, as a by-product, can produce systems traces as witnesses. Among these, [19], [20] have the greatest promise in terms of adaption to TSCs. These methods have already been used for consistency analysis of TSCs [21]. This article also briefly discusses the relation between TSCs and IL/DC.

3. From abstract to concrete scenarios

In subsection 2.1, we established the need for and advantages of abstract scenarios in the development, verification and validation of automated vehicles as well as the necessity of executing them in traffic simulators. To bridge this gap, we propose a methodical approach to simulating such abstract scenarios that is based on TSCs. The method is not only capable of handling abstract scenarios, but also integrates the concept of logical scenarios.

⁵ <https://www.foretellix.com/open-language>

⁶ <https://www.asam.net/project-detail/asam-openscenario-v20-1/>

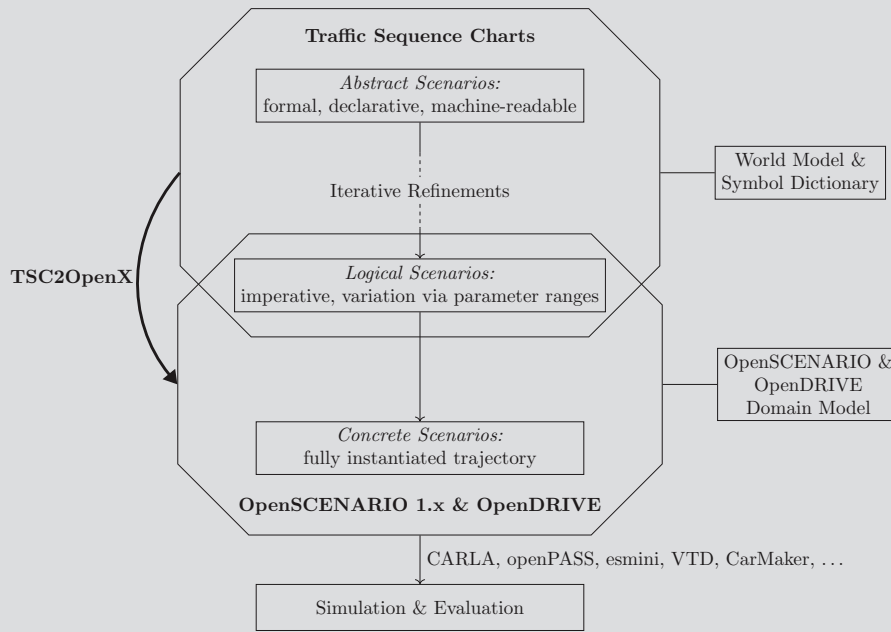


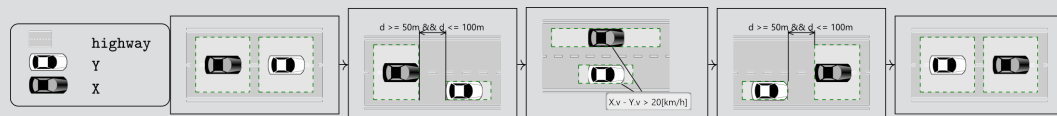
Figure 3: Proposed workflow for the concretization of abstract scenarios.

As Figure 3 shows, the work flow is based on two scenario description languages, specifically TSCs, which are able to represent abstract and logical scenarios, and OpenSCENARIO and OpenDRIVE, which are able to represent logical and concrete scenarios. The primary goal of the method is to produce input files for any compatible simulator when given an abstract or logical scenario in the form of a TSC by

1. finding a solution to the formalized constraints of the abstract scenario, and
2. creating executable simulation files from this solution.

As mentioned above, we start with an abstract scenario that has been specified using a suitable constraint-based description language such as TSCs. The constraints compared to the world model can range from simple invariants (e.g. $\text{dist}(X,Y) \geq 50\text{m}$) up to complex spatio-temporal properties. There is then the option of refining the constraint system in iterative steps, e.g. constraining $\text{dist}(X,Y) \in [50,100]\text{m}$ and $X.\text{speed} - Y.\text{speed} > 20\text{km/h}$, as shown in Figure 4. This process eventually reaches logical scenario level, where almost every entity is imperatively constrained by parameter ranges.

Figure 4: Iterative refinement of the overtake(X,Y) sub-TSC from the example in Figure 2 towards the logical scenario level, as shown in Figure 3.



The ability to refine scenario concretization levels is an essential part of a V-model approach [17]. While abstraction can be advantageous in the early concept phases in particular –e.g. for deriving coverage statements – it is necessary to describe more refined interaction patterns between traffic participants in later phases, e.g. for search-based testing. The proposed method is applicable to any scenario that can be specified by means of TSCs and is therefore also applicable to any system development phase that makes use of abstract and logical scenarios.

We resolve the constraint system describing the traffic scenario over the world model in order to obtain a satisfactory valuation of the variables, regardless of the refinement level eventually adopted. If a solution, i.e. a trajectory that satisfies the constraint system, is found, the result can be interpreted as a fully instantiated scenario where each variable is assigned a value for each point in time.

For reasons of computational complexity, the formalized constraints abstract from certain physical details, e.g., vehicles are represented using bounding boxes in a two-dimensional coordinate system. As the requirements for scenarios to be used in a V&V process are often more stringent, the need

for a high-fidelity solution arises. For example, concrete physical factors, such as road-tyre friction, are considered safety-relevant and appropriate models are being implemented in simulators. This being so, we tackle this challenge by assessing the concrete physics of the identified trajectory in a simulation environment.

Hence, we translate the identified solution into a standardized file format for simulation tools in order to draw on their rich implementation details, which concretizes the scenario even further. We obtain a pair of OpenDRIVE [4] and OpenSCENARIO [5] (OpenX) files by mapping the world model employed to the OpenX domain model, excluding actor catalogues and models. The rather abstract dynamics that are described in the world model are similarly instantiated by selecting concrete simulation models to be used within the simulator. The output of the TSC2openX approach can then be used as input for a wide range of compatible simulation software such as CARLA [22], openPASS [23], esmini [24], VTD [25] or CarMaker [26].

When such scenarios are to be used for the purpose of analysing or testing certain models and simulators or their properties, it may be necessary to pre-process the OpenSCENARIO file before feeding it to a simulator. This is the case whenever the actual trajectory of the vehicle under consideration is part of the behaviour to be analysed or tested against pass/fail criteria (e.g. a reference trajectory). Note that such testing requires a verification step that formally checks whether the simulation result is a member of the abstract scenario. Otherwise, no valid statements about coverage can be inferred. Examples of modifications to the concrete scenario specification that permit an assessment of a model's trajectory planning capabilities include

- the removal of single trajectory coordinates (for one or more actors),
- the removal of all trajectory points except for start and end points (for one or more actors),
- the replacement of entire time slices of trajectories by manoeuvres that ought to be carried out by actors.

Being derived from a solution of the constraint system defining the abstract scenario, the modified scenario does, however, guarantee that a solution trajectory exists within the world model.

4. Prototype based on traffic sequence charts

This section describes the technical details behind the implementation of the TSC2openX approach described in section 3. The main idea is to make use of state-of-the-art satisfiability modulo theories (SMT) solving [27] to find a satisfactory trajectory within the world model for a given TSC.

An SMT solver takes a constraint-solving problem in the form of logical formulas and outputs either a yes/no answer (“sat” or “unsat”) to the satisfiability of the problem or an “unknown” answer if it was not able to do so (due to a timeout or the limitations of the implemented decision procedures). In contrast to classical SAT solvers, SMT solvers are able to combine Boolean arithmetic with other theories such as linear arithmetic over real numbers⁷.

The core challenge when using SMT solving for trajectory generation is to find a suitable way of encoding the objects' trajectories in terms of free variables. In mathematical terms, a trajectory assigns piecewise smooth functions to all the free variables in the constraint system, e.g. the objects' x and y position variables. In order to represent and solve an object's trajectory in the SMT problem, the time domain is split into fixed-length time frames. In each time slice, each object's state (and the evolution of that state) is encoded using a set of free variables. Inside this, object positions and movements within each time slice are described as Bézier curves [28]. A Bézier curve is a smooth curve which is fully defined by a finite set of control points, as shown in Figure 5.

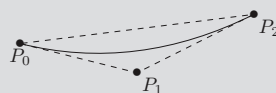


Figure 5: A quadratic Bézier curve and its control polygon.

Although Bézier curves have been applied to trajectory generation before [29][30][31], here we apply them in a novel way. Instead of using Bézier curves only for the pathway of an object and defining the speed profile separately, as most related approaches have done, the Bézier curve defines a time-dependent position here. Hence, the object's velocity and acceleration are defined as the first

⁷ For efficiency, non-linear parts of a vehicle dynamics model are approximated by piecewise linear constraints, as explained in the remainder of this section.

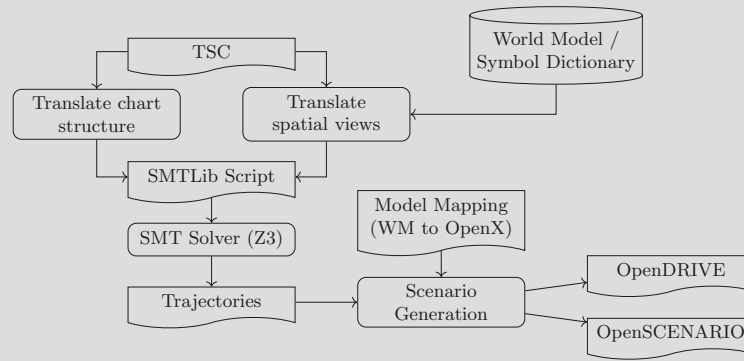


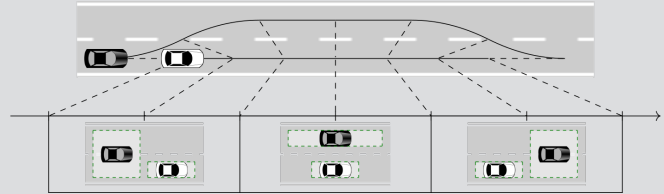
Figure 6: Control flow in the prototype implementation of TSC2OpenX.

and second derivative of the same Bézier curve. Using Bézier curves this way exploits some of their nice properties [28]: Linear combinations and derivatives of Bézier curves are themselves Bézier curves. Therefore, computing distances, (relative) velocities and accelerations (in a fixed direction) can be reduced to the evaluation of Bézier curves as well. Furthermore, all points on a Bézier curve are located inside the polygon spanned by its control points, which are represented as free variables in the SMT problem. Other state variables are either assumed to be constant within a time slice (e.g. turning indicator state), or are approximated by an upper and lower bound (e.g. bounding

SMTLib format [32] to drive the SMT solver Z3 [33]. If processing is successful, the output contains a satisfying trajectory of the world model that is used to specify the concrete scenario as a pair of OpenSCENARIO and OpenDRIVE files.

SMT problem generation is split into three parts (the third is not explicitly shown in Figure 6). The first part describes all possible mappings from chart nodes to time frames in a way that satisfies the overall TSC structure. Therefore, if the spatial views are satisfied on the mapped time slices, the whole TSC is satisfied. In keeping with bounded model checking, the trajectory is unrolled only for

Figure 7: Illustration of a time-sliced trajectory mapped to the nodes of a TSC.



box size⁸). In combination, this makes it possible to find a sufficient linear constraint for the satisfaction of a TSC over the world model.

Figure 6 shows the different steps that link a TSC to the concrete scenario. The chart structure and spatial views are processed separately, and the result is merged in order to form the input for the SMT solver. The prototype uses the standardized

a finite number of steps, which is increased step-by-step until a solution is found or a user-defined limit is reached. Figure 7 illustrates how the different time slices in a trajectory are mapped to the different invariant nodes of an overtaking manoeuvre in an excerpt from the running example in Figure 2. Note that the figure is an illustration; in the real experiment, a time slice length of 1s has been chosen which results in a trajectory with 14 time slices.

⁸ In the problem context, the bounding box is aligned to the axes of the global coordinate system, so it changes during a time slice due to a continuously changing heading direction.

$$\bigwedge_{i=0}^{n-1} \left\{ \bigwedge_{X \in \{A,B,C\}} \left\{ \begin{array}{l} started_X^i \Rightarrow started_X^{i+1} \\ ok_X^{i+1} \Leftrightarrow (started_X^i \Rightarrow ok_X^i \wedge inv_X^i) \\ complete_X^{i+1} \Leftrightarrow started_X^i \wedge ok_X^{i+1} \\ started_B^i \Rightarrow complete_A^i \\ started_C^i \Rightarrow complete_B^i \end{array} \right\} \right\} \quad \text{Equation 1}$$

The following formula Equation 1 is an excerpt from the SMT problem originating in the running example. It presents the BMC step function for the sequence depicted in Figure 7, unrolled for $n > 0$ steps. The invariant nodes are named A,B,C from left to right.

This encoding technique is inspired by Gonnord et al. [19]. In the formula, $started_X^i$ is an oracle variable that is true if node X is mapped to an interval starting at or before the current step i; the variable ok_X^i tracks if the node's invariant has been fulfilled from the beginning of that interval onwards, where inv_X^i indicates fulfillment in the current step and, finally, $complete_X^i$ indicates if it is possible to proceed to the next node in the sequence.

The second part translates each spatial view into a complex linear constraint. This constraint is a sufficient condition to satisfy the spatial view during a single time slice. For example, the constraint corresponding to the first node in Figure 7 is translated to a constraint (equation 2)

$$sv_A(\bar{X}.x_0, \bar{X}.x_1, \dots, \bar{Y}.x_0, \bar{Y}.x_1, \dots) \Leftrightarrow \bigwedge_{i=0}^2 \left\{ \begin{array}{l} 0.5\bar{X}.bbYmax + \bar{X}.y_i \lesssim_i 4.0 \\ 0.5\bar{X}.bbYmax - \bar{X}.y_i \lesssim_i 4.0 \\ 0.5\bar{Y}.bbYmax + \bar{Y}.y_i \lesssim_i 0.0 \\ 0.5\bar{Y}.bbYmax - \bar{Y}.y_i \lesssim_i 4.0 \\ 0.5\bar{X}.bbXmax + \bar{X}.x_i \lesssim_i -0.5\bar{Y}.bbXmax + \bar{Y}.x_i \end{array} \right\} \quad \text{Equation 2}$$

where $\lesssim_0 = \lesssim_1 = <$ and $\lesssim_2 = \leq$. For $i=0,1,2$, the pairs $(\bar{X}.x_i, \bar{X}.y_i)$ and $(\bar{Y}.x_i, \bar{Y}.y_i)$ denote the control points for the trajectories of the cars X and Y, while $(\bar{X}.bbXmax, \bar{X}.bbYmax)$ and $(\bar{Y}.bbXmax, \bar{Y}.bbYmax)$ denote the maximum bounding box sizes. Note that the world model employed defines a lane width of 4m here, which is why the bound is 4.0 in equation 2⁹.

$$\bigwedge_{i=0}^{n-1} (inv_A^i \Leftrightarrow sv_A(\bar{X}.x_0^i, \bar{X}.x_1^i, \dots, \bar{Y}.x_0^i, \bar{Y}.x_1^i, \dots)) \quad \text{Equation 3}$$

The third part combines the first two parts by instantiating the constraints from the second step for each time frame. For example, a constraint is introduced that relates the SMT encodings of invariant node A and its spatial view in equations

Equation 1 and Equation 2. Furthermore, constraints are added to ensure smooth transitions between the time slices and enforce additional invariants stated in the world model, e.g. upper velocity and acceleration limits.

This prototype implementation has been applied to overtaking manoeuvres on a highway based on Figure 2, with an increasing number of cars and corresponding pairwise overtaking manoeuvres. A simple configuration file is used to map the content of the symbol dictionary and bulletin board to concepts from the OpenX domain model. Each dynamic object in the bulletin board becomes an actor in the OpenSCENARIO file, while road and infrastructure objects go into the OpenDRIVE specification. For example, the configuration maps the type PassengerCar to the OpenSCENARIO vehicle of type Car, and the type DoubleLaneRoad to a straight road in OpenDRIVE with two lanes of 4m width. For the actors, follow trajectory actions are created that contain the calculated trajectories

s sequences of time-stamped waypoints. Because the SMT solution contains all Bézier control points, many intermediate points can be arbitrarily provided. The generated OpenDRIVE/OpenSCENARIO files were successfully executed by the esmini simulator [24].

⁹ The lane width has been fixed for the sake of simplicity. Of course, it is possible to let the solver determine an appropriate value within pre-defined bounds.

Table 1: Experimental performance results on a Windows 10 notebook equipped with an Intel Core i7-4700MQ CPU @ 2.39GHz and 8GB RAM, using version 4.6.0 of the Z3 solver.

#cars	#overtake manoeuvres	#steps	execution time [s]		solver stats for last unrolling step	
			overall	solver	time [s]	memory [MB]
2	1	6	1.98	0.35	0.05	4.80
3	3	9	4.89	1.20	0.63	10.69
4	6	10	12.83	5.86	4.39	21.83
5	10	12	48.25	36.66	28.99	43.07
6	15	13	81.09	63.87	43.65	73.11

For a first performance evaluation of the approach, the parallel overtaking example has been generalized to larger numbers of cars. Table 1 shows experimental performance results for increasing numbers of cars (1st column). Because every car in the abstract scenario overtakes all cars that are ahead of it at the beginning, the number of parallel overtaking manoeuvres (2nd column) – and hence the size of the TSC – grows quadratically with the number of cars. For each experiment, the table shows the number of unrolling steps (3rd column) required to find a satisfactory trajectory, and the execution time required (4th column). This figure includes the time needed by the SMT solver, which is also reported separately in the 5th column. The two columns on the far right of the table contain time and memory statistics as reported by the SMT solver for the last unrolling step. The experiments demonstrate that even the abstract scenario with six cars, which is quite complex due to the parallel overtaking manoeuvres, can be handled in less than two minutes. Note that the prototype implementation has not yet been fine-tuned for execution time. This explains the greater amount of time needed for SMT encoding compared to SMT solving for the simpler scenarios.

5. Conclusion

In this chapter, we have described the necessity of abstract scenarios in both the development and the verification and validation of automated vehicles. In particular, the specifying compact, machine-readable and human-understandable scenario catalogues hinges on abstraction. However, bridging the gap between abstract specification languages and high-fidelity simulations remains a challenging problem. To address this, we inserted space into the solution by proposing a method and providing a prototype implementation in a step towards automated tooling for simulation of abstract scenarios. Consequently, this prototype can be used to explore fruitful adjunct topics, e.g. defining iterative (statically/statistically sufficient) coverage and systematic variation of concrete scenarios. At a technical level, further steps include the integration of the proposed toolchain of state-of-the-art simulation tools and the modular inclusion of dynamic and behavioural models for agents instead of rigid trajectory specification.

References:

- [1] A. Leitner et al., "Testing & validation of highly automated systems." 2019. Available: <https://drive.google.com/file/d/15c10-e69dpvW5dma8-uS8hev17x-6V3zU/view>
- [2] C. Neurohr, L. Westhofen, T. Henning, T. de Graaff, E. Möhlmann, and E. Böde, "Fundamental considerations around scenario-based testing for automated driving," in 2020 IEEE intelligent vehicles symposium (IV), 2020, pp. 121–127. doi: 10.1109/IV47402.2020.9304823.
- [3] C. Neurohr, L. Westhofen, M. Butz, M. H. Bollmann, U. Eberle, and R. Galbas, "Criticality analysis for the verification and validation of automated vehicles," IEEE Access, vol. 9, pp. 18016–18041, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3053159.
- [4] Association for Standardization of Automation and Measuring Systems, "ASAM OpenDRIVE." 2020. Available: <https://www.asam.net/standards/detail/opendrive/>
- [5] Association for Standardization of Automation and Measuring Systems, "ASAM OpenSCENARIO." 2020. Available: <https://www.asam.net/standards/detail/openscenario/>
- [6] S. Ulbrich, T. Menzel, A. Reschka, F. Schuldt, and M. Maurer, "Defining and substantiating the terms scene, situation, and scenario for automated driving," in 2015 IEEE 18th international conference on intelligent transportation systems, 2015, pp. 982–988.
- [7] T. Menzel, G. Bagschik, and M. Maurer, "Scenarios for development, test and validation of automated vehicles," in IEEE intelligent vehicles symposium (IV), 2018, pp. 1821–1827.
- [8] W. Damm, E. Möhlmann, T. Peikenkamp, and A. Rakow, "A formal semantics for traffic sequence charts," in Principles of modeling, Springer, 2018, pp. 182–205.
- [9] W. Damm, S. Kemper, E. Möhlmann, T. Peikenkamp, and A. Rakow, "Traffic sequence charts - a visual language for capturing traffic scenarios," 2018.
- [10] W. Damm, E. Möhlmann, and A. Rakow, "A scenario discovery process based on traffic sequence charts," in Validation and verification of automated systems, Springer International Publishing, 2019, pp. 61–73.
- [11] F. Bock, A. Heinz, and J. Lorenz, "Efficient usage of abstract scenarios for the development of highly-automated driving functions," in 20. Internationales stuttgarter symposium, 2020, pp. 373–387.
- [12] F. Bock, C. Sippl, A. Heinz, C. Lauer, and R. German, "Advantageous usage of textual domain-specific languages for scenario-driven development of automated driving functions," in 2019 IEEE international systems conference (SysCon), 2019, pp. 1–8. doi: 10.1109/SYSCON.2019.8836912.
- [13] M. Butz et al., "SOCA: Domain analysis for highly automated driving systems," in 2020 IEEE 23rd international conference on intelligent transportation systems (ITSC), 2020, pp. 1–6. doi: 10.1109/ITSC45102.2020.9294438.
- [14] A. Eggers, M. Stasch, T. Teige, T. Bienmüller, and U. Brockmeyer, "Constraint systems from traffic scenarios for the validation of autonomous driving," Proceedings of Symbolic Computation and Satisfiability Checking, vol. 2018, 2018.
- [15] K. Scheibler, A. Eggers, T. Teige, M. Walz, T. Bienmüller, and U. Brockmeyer, "Solving constraint systems from traffic scenarios for the validation of autonomous driving," in Proc. Of the 4th SC-square workshop, 2019, pp. 2–12.
- [16] M. Klischat and M. Althoff, "Synthesizing traffic scenarios from formal specifications for testing automated vehicles," in 2020 IEEE intelligent vehicles symposium (IV), 2020, pp. 2065–2072.
- [17] T. Menzel, G. Bagschik, L. Isensee, A. Schomburg, and M. Maurer, "From functional to logical scenarios: Detailing a keyword-based scenario description for execution in a simulation environment," in 2019 IEEE intelligent vehicles symposium (IV), 2019, pp. 2383–2390.
- [18] M. R. Hansen and Z. Chaochen, "Duration calculus: Logical foundations," Formal aspects of Computing, vol. 9, no. 3, pp. 283–330, 1997.
- [19] L. Gonnord, N. Halbwachs, and P. Raymond, "From discrete duration calculus to symbolic automata," Electronic Notes in Theoretical Computer Science, vol. 153, no. 4, pp. 3–18, 2006.
- [20] B. Sharma, P. K. Pandya, and S. Chakraborty, "Bounded validity checking of interval duration logic." in TACAS, 2005, vol. 5, pp. 301–316.
- [21] J. S. Becker, "Partial consistency for requirement engineering with traffic sequence charts," 2020.
- [22] A. Dosovitskiy, G. Ros, F. Codevilla, A. Lopez, and V. Koltun, "CARLA: An open urban driving simulator," arXiv preprint arXiv:1711.03938, 2017.
- [23] J. Dobberstein et al., "The eclipse working group openPASS-an open source approach to safety impact assessment via simulation," 2017.
- [24] esmini Team, "Environment Simulator Minimalistic (esmini)." 2021. Available: <https://github.com/esmini/esmini>
- [25] M. Software, "Virtual Test Drive - Complete tool-chain for driving simulation applications." 2021. Available: <https://www.mscsoftware.com/product/virtual-test-drive>
- [26] PG-Automotive, "CarMaker." 2021. Available: <https://pg-automotive.com/de/>
- [27] L. De Moura and N. Bjørner, "Satisfiability modulo theories: Introduction and applications," Communications of the ACM, vol. 54, no. 9, pp. 69–77, 2011.
- [28] H. Prautzsch, W. Boehm, and M. Paluszny, Bézier and b-spline techniques. Springer Science & Business Media, 2013.
- [29] L. Han, H. Yashiro, H. T. N. Nejad, Q. H. Do, and S. Mita, "Bezier curve based path planning for autonomous vehicle in urban environment," in 2010 IEEE intelligent vehicles symposium, 2010, pp. 1036–1042.
- [30] X. Qian, I. Navarro, A. de La Fortelle, and F. Moutarde, "Motion planning for urban autonomous driving using bézier curves and MPC," in 2016 IEEE 19th international conference on intelligent transportation systems (ITSC), 2016, pp. 826–833.
- [31] J. Choi, R. Curry, and G. Elkaim, "Path planning based on bézier curve for autonomous ground vehicles," in Advances in electrical and electronics engineering-IAENG special edition of the world congress on engineering and computer science 2008, 2008, pp. 158–166.
- [32] D. R. Cok, The SMT-LIBv2 language and tools: A tutorial, 1.2.1 ed. 2013. Available: <http://smtlib.github.io/SMTLIB/SMTLIB-Tutorial.pdf>
- [33] L. de Moura and N. Bjørner, "Z3: An efficient SMT solver," in Tools and algorithms for the construction and analysis of systems: 14th international conference, TACAS 2008. proceedings, 2008, pp. 337–340. doi: 10.1007/978-3-540-78800-3_24.

Autonomous driving safety validation: A method to overcome parameter space explosion using Importance Analysis, Surrogate modeling, and informed sampling

Marco Zanella^{1*}
Mohamad Louai Shehab^{2*}
Ali Ayoub^{3,4}

Many attempts have been made to provide a proper safety assessment methodology for automated vehicles, yet none has been comprehensive enough to deliver a final answer. The major reason for this is that autonomous vehicles (AVs) present a hitherto unseen level of complexity in terms of

hardware and software, where the interactions within the system itself, and between the system and its surroundings, can be highly unpredictable. In our work, we attempt to deal with the parameter space explosion of scenario-based safety validation methods by proposing a probabilistic surrogate model coupled with an importance analysis, leading to the identification of safety-critical scenarios (influential input parameters) and hence minimizing the expected proving work. The major advantage of building the surrogate model is the efficient and low-cost online model evaluations that help to capture challenging scenarios and derive their probability of occurrence.

1. Introduction

Automated and autonomous driving concepts have progressed in huge leaps over the past decade. The technology has been rapidly improving and is promising in terms of nearing market penetration. However, there is still a substantial lack of work on the safety validation of these technologies. Since this technology is seemingly the next big step in the mobility and automotive industry, ensuring the proper safety of these vehicles is crucial prior to mass production and in obtaining public acceptance. Already existing methods of safety validation for automated vehicles can be systematically categorized into real-world testing, extreme value theory, formal verification, and scenario-based testing [1]. Each of these methods has its pros, cons, assumptions, and limitations.

For example, real-world testing has the advantage of testing the entire system under realistic con-

¹ D – MAVT, ETH Zurich, Switzerland

² Department of Mechanical Engineering, American University of Beirut, Lebanon

³ ETH Risk Center, ETH Zürich, Switzerland

⁴ Chair of Entrepreneurial Risks, D – MTEC, ETH Zurich, Switzerland

* Since these authors both contributed equally to this work, both are cited as lead authors.

ditions. Nonetheless, the number of challenging scenarios that the system faces in a real-world test drive is very low, which decreases the statistical significance of the miles driven. Moreover, a study by the RAND corporation showed that if human driver crash rate was considered a benchmark for automated vehicle safety, a fleet of 100 automated vehicles would have to drive for 12.5 years with no fatalities at a continuous 25 miles per hour [2]. This becomes unfeasible in the anticipated market penetration plan, especially that software and hardware are constantly changing and evolving. Under this approach, every new version of the software needs to go through the same cycle to ensure proper safety performance.

Extreme value theory (EVT) has the advantage of extrapolating data for rare events that did not occur in the observation horizon. However, this method is very sensitive to the safety metric used and how much information this metric holds about the accident [3].

Formal verification aims to replace the entire process of test cases and manual driving by providing an abstract theoretical model of the system and its environment. While it eliminates a lot of the verification work, it has to contend with an extremely dynamic system-of-systems, making it almost impossible to perfectly model the system and its environment without certain assumptions being made.

Simulation-based (or scenario-based) methods are a proposed alternative to the statistical approach of real-world testing. It is by far a much faster method of assessing the performance and safety of advanced driver-assistance systems (ADAS) where these systems have driven almost an order of magnitude more miles in simulation than in real-world testing [4]. One problem with simulation-based methods is replicating the complexity of the real world and its uncertainties. This raises questions concerning the coverage and completeness of the scenarios driven in simulation [5]. In other words, safety validation approach using scenario-based methods should be clear on the risk coverage of the test and how exhaustive these tests are in representing corner scenarios for the vehicle. More concretely, a good question to address on this point is: How many miles driven in simulation equate to a mile in the real world?

This work adopts the scenario-based approach to the safety validation of automated vehicles. In terms of legislative foundations, it is the favoured paradigm in the EU, where it is known as the “type-approval” paradigm [4]. Unlike the major paradigm used in the USA, which encourages test driving as much as possible for safety validation, this approach allows manufacturers to leverage simulation and virtual testing while still obtaining official approval. One recent breakthrough in governmental guidelines is the recent regulations on ALKS (SAE level 3 systems) issued by the UN-ECE [6]. These regulations set out the types of system documentation the manufacturer must provide, conditions under which the system’s control strategies will be tested, vehicle safety when faults are invoked in individual system units, a description of the interaction between the driver and the vehicle, etc.

The first and main problem which emerges in the scenario-based approach is the parameter-space explosion. More abstractly, if the driving scenario⁵ has n parameters: P_1, P_2, \dots, P_n , and each parameter has m_i assumed discrete realizations, the overall number of possible parameter combinations (concrete scenarios) is:

$$S_n = \prod_{i=1}^n m_i$$

Hence, the overall number of possible parameter combinations (scenarios) grows exponentially as m_n . For example, the cut-in scenario alone results in an order of 10^{23} parameter combinations or concrete scenarios [7]. This clearly indicates that a brute-force method of trying out all scenarios is not feasible.

In this paper, we propose a method for overcoming this parameter space explosion by leveraging surrogate modelling and importance analysis in series. This makes it possible to create a sensitive high dimensional criticality manifold that maps each parameter combination to its respective criticality. Hence, an informed search on this manifold can determine which regions, and in turn which parameter combinations, present more challeng-

⁵ a “scenario” is defined in greater detail in section 5.1

ing scenarios for the automated system. Choosing the threshold of criticality properly reduces the initial space into a much smaller set of scenarios representing true corner cases and challenges for the automated vehicle. The rest of the paper is structured as follows: Section 2 is a literature review of certain existing methods for dealing with parameter space explosion. Section 3 introduces the proposed importance analysis methods, namely linear discriminant analysis (LDA) and Morris elementary effects. Section 4 describes the surrogate-based probabilistic framework. Section 5 brings all parts together to illustrate the overall proposed methodology of combining surrogate modelling and importance analysis to tackle parameter space explosion. Section 6 provides a conclusion and discussion of future work plans.

2. Literature review

One way of dealing with exploding parameter-space is functional decomposition, as proposed by Amersbach et al. [7]. The basic idea here is to generate test cases for subsystems of ADS, rather than the entire system. This is done by breaking down the driving task into 5 functional layers (information reception, information processing, situational understanding, behavioural decision, and action), each of which is tested individually and evaluated on its interfaces. The safety evaluation criteria would then entail applying fault tree analysis or similar methods. This is what's known as "particular testing". Its main advantage is that it shrinks the parameter space because most parameters only influence some layers rather than all of them. For example, weather condition parameters influence only the first two layers, namely information reception and processing. Amersbach et al. [7] were able to use functional decomposition to reduce the number of required test cases by a factor of between 20 and 130. However, their work is still ongoing. There is still no evidence that testing individual sub-systems independently is a substitute for testing the entire system, especially considering the inherent complexities.

Another proposed way forward is to use criticality metrics to define critical scenarios. When identifying critical scenarios by a simulation-based method, it is first necessary to define criticality (i.e., the metric to measure criticality should be defined). Several safety metrics already exist, for example, time-to-collision (TTC) [8] (the most commonly used metric, defined as the time until a collision between the ego vehicle and the obstacle vehicle happens), time-to-break (TTB) [9] (defined as

the time required until an unavoidable accident happens at a speed equal to 0 m/s), required deceleration a_{req} [10] (the deceleration required of the ego-vehicle to generate a collision at 0 m/s), etc. It is obvious that the fitness of a metric varies as the logical scenario requirements change. Hallerbach et al. [11] developed their own metrics by dividing the domain of interest into individual, nano, micro and macro-regions, and defining a metric for each of these regions. These metrics are generally related to traffic flow density and average speed fluctuations within increasing spatial domains. They then went on to normalize these metrics and optimize the weighting of each before adopting the weighted average as the criticality metric. The threshold for classifying a scenario as critical or non-critical is then determined by "receiver operating characteristic" (ROC) graphs. Another criticality metric, proposed by Junietz et al. [12], uses model predictive trajectory optimization, which measures driving requirement levels in specific situations. The driving requirements include necessary acceleration in lateral and longitudinal directions, the margin for correction of course angle (side distance), and the margin for correction of speed (front distance). Criticality is then defined as the combination of the driving requirements above, which describe the driving difficulty of the situation in question. The objective function comprises these 4 components, and its minimum defines the criticality of the scenario. MPC (model predictive control) is then used to optimize the trajectory subject to the criticality above, within a prediction horizon.

3 Importance analysis methods

In this section, we describe the two proposed importance analysis methods to be used within the overall framework. The methods here are explained in abstract terms. Implementation details will be discussed in section 5.

3.1 Linear discriminant analysis

One of the first algorithms to come to mind when dealing with dimensionality reduction is linear discriminant analysis (LDA). The basic idea behind LDA is to find a linear combination of the input features that produces maximum separation of different classes into distinct clusters. In this case, the input features are the parameters of the scenario, and the different classes represent varying levels of crash criticality (a binary critical/non-critical class will be used for simplicity). Using this linear combination of features, the higher dimensional data can be projected into a much

lower dimensional space without losing a lot of information. The projected space is commonly a 2-dimensional plane for visualization purposes. By looking at the Euclidean components of the projection vectors, it is possible to determine the features that bear greater weight in affecting the output-label distribution. Thus, this gives us an idea of which feature is more important in orienting the projection space and will hence yield more information on the criticality of the crash. Mathematically speaking, LDA is an attempt to find a linear combination of the input features $Z \in \mathbb{R}^p$ – where p is the feature dimension – in the form $Z = v^t X$, which maximizes the separation of the classes. X represents the direction vector for each parameter. We obtain v by solving the following optimization problem (also known as the Rayleigh quotient) [13][14]:

$$\max_{v : \|v\| = 1} \frac{v^t \sum_B v}{v^t \sum_W v}$$

Where \sum_B represents the between-class variance, \sum_W represents the within-class variance. In other words, LDA is searching for the linear combination vector of coefficients v which maximizes the between-class variance with respect to the within-class variance. Applying the Karush–Kuhn–Tucker (KKT) conditions on the problem above, it can be shown that v satisfies:

$$\sum_W^{-1} \sum_B v = \lambda v$$

This means that v is an eigenvector of the matrix $\sum_W^{-1} \sum_B$. Hence, the algorithm first estimates the matrices \sum_B and \sum_W (generally using maximum likelihood estimate), solves for the eigenvectors of $\sum_W^{-1} \sum_B$, and sets v to be the eigenvector with the largest eigenvalue. Roughly speaking, the larger the eigenvalue is, the more information it bears about the distribution of the data. Hence, the common approach is to project the data into the subspace formed by the two eigenvectors with the two largest eigenvalues. These vectors are called linear discriminants.

3.2 Morris Elementary Effects

The Morris elementary effects method is an analytical framework for assessing how uncertainties in the model input propagate to uncertainties in model output [15]. One major application of the Morris analysis is to preclude redundant input parameters [16], thus reducing the input parameter space dimensionality.

Going back to our initial definition, consider a model which has n input parameters: P_1, P_2, \dots, P_n . The Morris method constructs an n -dimensional unit hypercube in which each dimension is divided into m nodes. This constructed hypercube is then rescaled to match the range of each input parameter. Rescaling the hypercube results in a grid Ψ , which permits selection of a particular scenario vector, $\vec{p} = [p_1, p_2, \dots, p_n]$ from the random vector $\vec{P} = [P_1, P_2, \dots, P_n]$. Then, a perturbation parameter Δ is chosen randomly from the set

$$\left\{ \frac{1}{p-1}, \frac{2}{p-1}, \dots, \frac{p-1}{p-1} \right\}$$

The Morris elementary effect for $P_i, i = 1, 2, \dots, n$, is defined as:

$$EE_i = \frac{Y(p^* + e_i \Delta) - Y(p^*)}{\Delta}$$

where e_i is the n -dimensional unitary vector and Y is the model output, i.e. the criticality metric in our case. For each vector \vec{p} , multiple perturbations $\vec{p} + e_i \Delta$ are possible. Exhausting all possible perturbations in the grid Ψ would create a computationally insoluble problem since the number of combinations grows as m^n . The Morris analysis overcomes this by sampling r random feature vectors \vec{p} and compute in the i -th elementary effect for each of them. This results in r elementary effects values for the i -th parameter. Two sensitivity measures are calculated from these values: the sample mean μ_i and the sample standard deviation σ_i . A large μ_i indicates that P_i has a large influence on the model output, i.e. a small variation in P_i results in a large change in Y . σ_i is the variability of the elementary effects caused by the change in the input feature vector \vec{p} . Thus, a large σ_i indicates that the elementary effects of P_i are highly affected by the individual parameters' values of the sampled featured vectors, which means either the model output varies non-linearly with P_i , or P_i has interactions with other parameters $P_j, i \neq j$. Otherwise, small μ_i and σ_i indicate the lower importance of the parameter P_i .

4. Surrogate-based modelling

We propose a data-driven probabilistic framework for identifying critical scenarios for AVs based on stochastic spectral methods, namely polynomial chaos expansion, PCE [17, 18].

Relying heavily on both virtual and physical simulations of the autonomous vehicle system (considered as a black box in this study), a dataset of input/output pairs is used to train a metamodel

which surrogates an unknown, generally nonlinear, function mapping the input scenarios (modelled within a probabilistic framework to capture the intrinsic stochastic nature of the system's environment) to a risk metric, that we call criticality function. It quantifies the severity of the input scenarios by weighing various safety performance indicators (SPLs), obtained through (virtual and physical) experiments [11,19].

The idea behind PCE is to approximate the true *criticality function* using a series (expansion) of multivariate orthogonal polynomials in a suitable vector space. Constructing an expansion series consists in finding the weight function (in respect to which the polynomial series is said to be orthogonal) that best approximates the true model using a low order of expansion. Here, the chosen vector space is the (stochastic) Hilbert space $L^2_{f_x(x)}(D_x)$ produced by the functions which are square-integrable with respect to the weight function $f_x(x)$, the joint probability density function of the input parameters spanning the scenario space. Therefore, by using the joint pdf of the scenario space to build the orthonormal basis from which to expand the *criticality function*, all the parameter uncertainties captured by their marginal distributions are embedded in the topological structure of the functional space where the *criticality function* is approximated.

Our algorithm relies on offline-online computational splitting. The expensive offline stage, for which long and expensive simulations are required to build the surrogate, is accompanied by a very time-efficient online stage in which the metamodel is evaluated at low cost for uncertainty quantification and sensitivity analysis purposes. Compared with other techniques, PCE performs better on the small-data regime, reducing the offline cost, and producing the Sobol' indices needed for the sensitivity analysis (almost) for free, potentially leading to a significant reduction in the model order [11, 20, 21, 22].

5. Proposed methodology

A scenario identifies a scene or a sequence of scenes in which a certain driving action is performed [23]. Assuming n is the number of relevant parameters needed to characterize a scenario with sufficient accuracy, then the scenario space is a topological entity that resides in R^{n+1} and collects all possible scenarios.

Our aim is to build an efficient stochastic surrogate modelling technique capable of (1) identifying a finite subset of potentially critical scenarios

within the scenario space, and (2) indicating the probability of them occurring. To achieve this goal, a risk metric capable of quantitatively capturing the severity (or criticality) of a scenario is mathematically defined. This criticality function maps each possible scenario onto an n -dimensional smooth manifold (or smooth hypersurface) called the *criticality surface*.

By exploiting the intrinsic stochastic nature of the parameters spanning the scenario space, the true criticality function is surrogated within a data-driven modelling framework via the PCE stochastic spectral method. Surrogate model training is made sensitive-by-construction to the parameters likely to exert a greater effect by applying one of the importance analysis methods described in section 3.

After the surrogate model has been built, an optimization routine applied to the (fully differentiable) surrogate criticality surface finds the most severe regions (critical regions) as the portions of the hypersurface where criticality is above a certain threshold known as the *criticality limit*. Finally, the critical scenarios are defined as the n -dimensional algebraic vectors containing the coordinates on the criticality surface identifying the parameter combination where the criticality function is higher than the criticality limit.

The overall method can be summarized in 5 phases:

1. Parameter identification and probabilistic modelling
2. Construction of the scenario space and sampling of representative scenarios
3. Refinement of initial sampling by applying an importance analysis method
4. Surrogate the criticality function with PCE
5. Identify critical scenarios on the criticality surface and their probability

5.1 Parameter identification and probabilistic modelling

Following the state-of-art method provided by the PEGASUS project [24], the characterization of scenarios involves abstraction from the verbal description (functional scenarios) to the actual numerical realization (concrete scenarios) passing through an intermediate step in which the verbal description is translated into a mathematical language (logical scenarios).

First, we derive an analytical procedure to transition from the potentially infinite dimensions of the real-world parameter space to a relevant subset of functional scenarios described by a finite, and relatively small, number of parameters.

Functional scenarios can be derived from two main sources: historical data, and expert knowledge.

Below is a list of some data-driven sources:

- Real-world driving from in-vehicle recordings
- Previous field-operational test
- Naturalistic driving
- Real-world traffic observation data (aerial monitoring, highway cameras...)
- Historical accident data, in-depth statistics (see GIDAS case study)

Since AVs are not present in the current/past traffic environment, data-driven sources give a biased view of traffic dynamics that excludes the presence of AVs and their expected impact. Although unforeseen scenarios cannot be detected, it is expected that a certain amount of general information about the traffic would remain unaltered (e.g., road conditions, traffic infrastructure, environmental conditions...). For this reason, methods based on past data are still useful to broadly characterize the environment. On the other hand, expert knowledge on the expected behaviour of AVs in certain driving conditions (e.g., at intersections) would be of significant assistance to the identification of unforeseen functional scenarios which cannot be extrapolated from historical data.

A balanced combination of these two complementary sources, conjoined with a time-dependent parameter that estimates the market penetration of AVs in a country/region at a certain point in the future, has the potential to capture a relevant set of functional scenarios. An unresolved question remains regarding the *minimum* number of scenarios needed for sufficient *coverage* of the real world traffic.

Parametrization is the mathematical process that transforms the verbal description of a functional scenario into its mathematical representation, called the *logical scenario*. Following Schuldt [23], the representative layers describing a driving scene (*parameters*) are:

- Road-level
 - o Geometry, topology
 - o Quality, boundaries (surface)
- Traffic Infrastructure
 - o Structural boundaries
 - o Traffic signs, elevated barriers
- Temporary manipulation of the previous two levels
 - o Geometry, topology (overlaid)
- Objects
 - o Static, dynamics, movable
 - o Interactions, manoeuvres
- Environment
 - o Weather, lighting, and other surrounding conditions

The probabilistic framework that leverages our method comes into play at the parametrization stage. Each parameter is realistically bounded within a certain domain, and every possible realization (both discrete and continuous) is distributed according to some probability density function (pdf). Depending on the amount of data to hand, different methods are available to construct the pdfs [22]:

- **No data available:** expert judgment based on physical consideration. For example, a case can be made for positiveness or boundaries. A powerful method within this context is the maximum entropy principle, which can be used to derive the pdf for which only parameters with just a little information is available.
- **A large amount of data:** statistical inference methods. Descriptive statistical techniques in a bid to fit a family of distributions.
- **A small number of observations are available:** a combination of expert judgment and Bayesian inference, i.e. the expert knowledge provides the prior distribution, which then gives a posterior distribution when updated by applying the available observations (likelihood).

A parameter is therefore modelled as a real random variable $X: \Omega \rightarrow D_x \in \mathbb{R}$, completely defined by its cumulative density function (cdf), denoted by $F_X(x) = P(X \leq x)$, where Ω is the parameter space.

5.2 Construction of the scenario space and sampling of representative scenarios

Since each parameter is modelled using a probability distribution, the scenario space is defined by a multivariate random vector:

$$X: \Omega \rightarrow D_X \in \mathbb{R}^q, q > 1,$$

whose components $[X_1, \dots, X_i, \dots, X_q]$ are scalar-valued random variables in the same probability space (Ω, \mathcal{F}, P) , where Ω is the sample space, \mathcal{F} is the sigma-algebra, and P is the probability measure. To go into more detail, let us take a concrete scenario x , where X_i is the probability distribution of the i -th parameter and q is the total number of parameters describing the scenario. Then the probabilistic model for X is defined by the joint pdf, $f_X(x)$, constructed with all the marginal distributions $[f_{X_1}(x), \dots, f_{X_q}(x)]$.

Assuming independence of all the parameters $[X_1, \dots, X_q]$, it is possible to compute the joint pdf as the tensor product of the marginal univariate distributions:

$$f_X(x) = \prod_{i=1}^q f_{X_i}(x_i).$$

Independence implies that the realization of one parameter does not affect the probability distribution of the others. However, dependencies may be also modelled within the Copula framework, making it possible to couple the dependent marginals. Without loss of generality, we will proceed by considering only the independent case.

The *scenario space*, X , is therefore defined by a random vector collecting the parameter's marginal distributions, X_i , while the scenario, x , is the vector of the realizations, x_i , sampled from each parameter's marginal distribution:

$$x = [x_1, \dots, x_q].$$

Geometrically, the scenario space is a q -dimensional hypersurface, residing in \mathbb{R}^{q+1} , where the $q+1$ -th dimension is the probability associated with each scenario through the joint pdf.

The probability of occurrence of a certain region (collection of scenarios) is derived by employing the joint cdf:

$$F_{X_1, \dots, X_q}(x_1, \dots, x_q) = P(X_1 \leq x_1, \dots, X_q \leq x_q) = \int_{x_1} \dots \int_{x_q} f_{X_1, \dots, X_q}(x_1, \dots, x_q) dx_q \dots dx_1.$$

Using this multivariate distribution, a set of input scenarios is created using Latin hypercube sampling, which exhibits good coverage of the input space even in fat-tailed distributions.

These scenarios are fed into a self-driving simulator, in this case CARLA [25]. CARLA is an open-source simulator for autonomous driving research. It supports open digital assets such as urban layouts, buildings and vehicles, which can be used freely for validation. Once the CARLA engine is configured with the sampled scenario parameters, the virtual testing run will output various criticality metrics, including route completion and infraction rate (number of collisions with other agents and invoked hazardous manoeuvres). These metrics serve as the safety performance indicators (SPIs) – as mentioned above – and are used later in section 5.4 when surrogating the criticality function.

5.3 Refinement of the initial sampling through an importance analysis method

By this stage, we have obtained a set of input-output mappings relating the sampled scenarios to their criticality values. Before proceeding to build the surrogate model, an importance analysis method is applied to this dataset to determine which parameters are more important – i.e. adapt the surrogate modelling to increase its sensitivity to the parameters that exert a greater effect. The two methods proposed are linear discriminant analysis (LDA) and Morris elementary effects analysis. The methods can be implemented in series, but the main task is to assess the performance of each method individually.

If LDA is implemented, the criticality metric scalar value should be first turned into categorical (critical/non-critical) after deciding on the threshold limit, i.e. the threshold for which a scenario is labeled as non-critical or critical. This input-output mapping of data is fed into an LDA algorithm to compute the discriminant eigenvectors. By considering the k eigenvectors with the largest eigenvalues, the α parameters which have the largest Euclidean components are set as the more important parameters. Now the original input dataset is refined by refining the selected most influential parameters. This means that for each scenario previously generated, all parameters remain the same except for the influential parameters, which are resampled in a more refined manner to generate additional scenarios. This results in an expand-

ed dataset that now includes scenarios sensitive to the most important parameters based on LDA. These added scenarios are once again fed into the simulator in order to determine their criticality value.

Similarly, with Morris elementary analysis, the input parameters which have the highest sensitivity values are used to refine the dataset as before. However, with a Morris analysis, there is no need for binary categorization of the output values since the analysis acts on numerical output.

5.4 Surrogating the criticality function

As mentioned above, the values output by the simulator serve as a metric – composed of several SPLs – that we can use to characterize the criticality, (i.e. hazardousness/severity) of scenarios. This metric is needed to classify regions of the scenario space. The literature suggests several SPLs, which, depending on the different features of the environment's dynamics, are used to identify situations with a small collision avoidance solution space [26, 27].

Formally speaking, a generic SPL, s_i , is a function of the q -input parameters:

$$s_i = s_i(x_1, \dots, x_q) = s_i(x)$$

For a defined set of m -SPLs, take the vector $S=[s_1, \dots, s_m]$. Following the approach proposed by Hallerbach [11], a criticality function $C:R^q \rightarrow R$ is defined as a linear combination of the components of S :

$$C = B \cdot S = \beta_1 s_1 + \dots + \beta_i s_i + \dots + \beta_m s_m$$

where B is the vector of coefficients that weights each SPL according to certain importance criteria.

We believe that B , S , and the threshold limit for classifying a scenario as critical should be defined in terms of a standard safety validation criteria agreed with various stakeholders within the AV system (insurance, manufacturers, regulator...).

The need to surrogate the criticality function stems from the computational and paid effort required to simulate a large number of scenarios from which to derive the SPLs (needed to build the criticality function). Therefore, a model surrogating the simulator that is based on a sufficiently large number of simulations (input-output) will be a more efficient and computationally cheaper way of calculating the output (corresponding criticality) for any new input scenario.

The criticality function C can be generically formulated as $C=M(X)$, where M is the virtual or physical simulation engine used to simulate the scenarios collected in the scenario space, and X is the random vector of the input parameters. For the purposes of brevity, we will consider the univariate case, where X is a random variable (assuming the parameter space is 1-dimensional). To represent this function with the polynomial series previously described, we need to impose the square-integrability condition on C . Since a function f is said to be square-integrable if and only if:

$$\int_{DX} f(x)^2 w(x) dx < +\infty,$$

and the second moment of the function C reads:

$$E[C^2] = E[M^2(X)] = \int_{DX} M^2(X) w(x) dx$$

the condition for the function C to be surrogated by PCE is the boundedness of the second moment of the criticality function C :

$$\int_{DX} M^2(X) w(x) dx < +\infty$$

Under the unique assumption that $M(X) \in L^2_w(D(X))$, the stochastic output response C is cast as a convergent series:

$$C = M(X) = \sum_{\alpha \in N^m} y_\alpha \psi_\alpha(x)$$

By truncating the infinite series, the surrogate model C^{PC} reads:

$$C^{PC} \approx \sum_{\alpha \in A^{m,p}} y_\alpha \psi_\alpha(x)$$

Where $\psi_\alpha, \alpha \in N_m$, is the set of orthonormal multivariate polynomials that form the basis of the space $L^2_{f_{X(x)}}(D_X)$, and y_α are appropriate coefficients by projecting the model response $M(X)$ on to the basis ψ_α , and $A^{m,p}=\{\alpha \in N^m: |\alpha| < P, P \in N^+\}$ is the multi-index set of polynomials of total degree $|\alpha| = \sum_{i=1}^m \alpha_i$. More formal details on PCE can be found in [15, 16, 19, 20].

The surrogate criticality surface L , represented by a smooth manifold embedded in R^{q+1} , is the geometrical entity on which the surrogate criticality function maps each tested scenario:

$$L(C) = \{X, C(X) | x \in D_X\},$$

Surrogate construction has been reduced to find a set of coefficients $y=y_{\alpha_1}, \dots, y_{\alpha_{|A|}}$. This can be done intrusively (e.g., projection equation residu-

als in the Galerkin sense), or non-intrusively (e.g., stochastic collocation and the least square regressions methods [22]).

5.5 Critical scenarios identification

Identifying critical scenarios requires an analysis of the local behaviour of the surrogate model (criticality surface) around its maxima. Since the original model is embedded in a very in-expensive-to-evaluate function, optimization algorithms such as genetic algorithms and simulated annealing can be used as a cheap method of investigating the regions on the criticality surface where the criticality is higher than the criticality limit (C_{lim}). These areas are called critical regions $C_r \in L$:

$$C_r = L: C > C_{lim}$$

The set of input parameters, x , which identify the critical regions are called **critical scenarios** c_{s_i} 's, with $C_s \in C_r$ being the set of critical scenarios:

$$C_s = [c_{s_1}, \dots, c_{s_{N_c}}],$$

N_c is the total number of critical scenarios identified and for q input parameters $[x_1, \dots, x_q]$,

$$c_{s_i} = [x_{1_i}, \dots, x_{q_i}] : C(c_{s_i}) > C_{lim}$$

Visually, critical scenarios are the projection of the critical regions onto the q -dimensional parameter space.

We expect critical scenarios to occur rarely, and for this reason, they fall within regions with low probability densities. At this stage, we propose a method for increasing the accuracy of the surrogate's modelling of the criticality function. We propose introducing a re-sampling strategy that refines the existing surrogate by increasing the likelihood of critical scenarios being sampled during the training phase. This is done by means of circumscribed informed sampling within the critical regions that have already been identified. The new input samples are therefore obtained from the estimated surrogate criticality function, rather than from their initial distribution. The new input data is then fed into the simulator for criticality calculation, and the surrogate is then refined accordingly. The optimization procedure described above can now be repeated to identify the new refined critical regions $C_r \in L$ and critical scenarios c_{s_i} where $C > C_{lim}$.

For the risk assessment, we derive the probability of occurrence for the critical scenarios ultimately identified by exploiting the input parameters'

probabilistic modelization, i.e. using the input parameters' joint cdf. To wrap up, the outlook of this method is to:

- Identify a set of critical scenarios (optimization on the criticality surface) $C_s = [c_{s_1}, \dots, c_{s_{N_c}}]$, with $c_{s_i} = [x_{1_i}, \dots, x_{q_i}] : C(c_{s_i}) > C_{lim}$
- Quantify their severity using the surrogate criticality function $C^{PC}(C_s)$
- Compute their probability of occurrence $P = [P_{cs_1}, \dots, P_{cs_{N_c}}]$

Finally, we can perform post-processing operations on the surrogate function to derive different uncertainty metrics. One option is to calculate the probability distribution of the surrogate criticality function, i.e. the probability of encountering a critical situation. This is done by calculating the relative volume of the critical region using the ratio of the critical region volume to the overall surrogate criticality function volume. Since analytical integration might be very expensive depending on the dimensionality of the surrogate parameter space, the classic Monte Carlo method can be applied to the scenario space to estimate the integrals (volume). Note that the pdf of the criticality function is a function of the criticality limit C_{lim} , and can thus be parametrized accordingly. The calculated unconditional probability of encountering a critical situation can be seen as a measure of the safety of autonomous vehicles which can be benchmarked against human-driven vehicles for legislative and safety comparison purposes.

Furthermore, one of the most significant benefits of PCE [21] is the computational convenience of performing sensitivity analyses (e.g. Sobol indices). This provides a deeper understanding of the model structure and sets out to investigate the parameters that contribute most to response variability. Reducing the uncertainty of these important parameters would significantly reduce the prediction uncertainty.

The total PC-based Sobol' indices for the i -th parameter reads [23]:

$$S_i^{Tot} = \sum_{\alpha \in A_i^{Tot}} y_a^2$$

Since they are defined to total 1, we can rank the parameters by their relative importance to output variance. Depending on the results of the sensi-

tivity analysis, parameters that are not found to be influential can be set to a fixed constant value, thereby reducing the model's complexity.

6. Conclusion and future work

In our work, we have proposed a surrogate model coupled with importance analysis to reduce the high dimensionality of the critical scenarios needed for the safety validation of automated vehicles. Based on input-output mappings of scenarios and criticality respectively, a PCE-based meta model is used to surrogate a criticality function. Importance analysis is used to refine the initial sampling procedure and to capture the dominant features in the data.

This proposed framework will be applied in future work with the CARLA self-driving car simulator as the virtual driving engine. Any open-source self-driving algorithm can be potentially used as the autonomous vehicle's brain, and many are available on the CARLA leaderboard website. The UQlab framework [22] developed at the Chair of Risk, Safety, and Uncertainty Quantification of ETH Zurich will be used for surrogate modelling.

Two relevant questions still remain:

- How many scenarios are needed to build a sufficiently robust surrogate model?
- What is the best set of safety performance indicators – and their respective weighting – to define the criticality function?

We intend to validate our model against a crash dataset obtained from the California Department of Motor Vehicles [28]. The California DMV developed an autonomous car testing programme in 2014 to regulate the development and deployment of automated car technology. This has forced manufacturers who are testing AVs to report, within 10 days, any collision which led to property damage, human injury, or death. Our dataset contains a total of 164 reports (logged between 2017 and 2020) that have been manually encoded into 164 data points. Each report includes information on the date and time of the collision, the manufacturer's information, the people or vehicles involved (car, motorcycle, bike, pedestrian, etc.), road conditions, and nature of the damage. This information is used as the features or the independent variables of the model. Crash severity is used as the dependent variable (output label). The major limitation is that the dataset does not include some of the input parameters need-

ed by the simulator, which means we will have to use default or some assumed realistic values to assess the crash scenario using our surrogate model. Confirmation between the model output and the validation set indicates the good performance of the model for predicting challenging scenarios.

References

- [1] P. Junietz, W. Wachenfeld, K. Klonecki and H. Winner, "Evaluation of Different Approaches to Address Safety Validation of Automated Driving," 2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2018, pp. 491-496, doi: 10.1109/ITSC.2018.8569959
- [2] N. Kalra and S. M. Paddock, "How many miles of driving would it take to demonstrate autonomous vehicle reliability?," RAND Corporation, 2016
- [3] D. Asljudung, J. Nilsson, and J. Fredriksson, "Using Extreme Value Theory for Vehicle Level Safety Validation and Implications for Autonomous Vehicles," IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2017.
- [4] W. Kroger and A. Ayoub, "Autonomous Driving: A Survey with Focus on Reliability and Risk Issues," Environment Systems and Decisions 2021. Under Review.
- [5] W. Kroger, "Autonomous Driving: A Survey with Focus on Reliability and Risk Issues", e-proceedings of the 30th European Safety and Reliability Conference and 15th Probabilistic Safety Assessment and Management Conference (ESREL2020 PSAM15).
- [6] UN, Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to Automated Lane Keeping Systems, informal document, Regulation No. 157, March 2021.
- [7] Christian Amersbach, H. Wimmer, Functional decomposition – A contribution to overcome parameter space explosion during validation of highly automated driving, in: Traffic Injury Prevention, volume 20 (1), 2019.
- [8] Junietz, P., Schneider, J., Winner, H., "Metrik zur Bewertung der Kritikalität von Verkehrssituationen und -szenarien," 11. Workshop Fahrerassistenzsysteme und automatisiertes Fahren, FAS 2017, Uni-DAS e.V., Walting, Germany, 149-160, March 29-31, 2017, ISBN:978-3-00-055656-2.
- [9] Hayward, J.C., "Near miss determination through use of a scale of danger," 51st Annual Meeting of the Highway Research Board, Washington D.C., USA, Jan. 17-21, 1972
- [10] Hillenbrand, J., Kroschel, K., Schmid, V., "Situation Assessment Algorithm for a Collision Prevention Assistant," In: Intelligent Vehicles Symposium, 2005. Proceedings, IEEE, Las Vegas, USA, 459-465, June 06-08, 2005.
- [11] Sven Hallerbach, Y. Xia, U. Eberle, F. Köster, Simulation-based identification of critical scenarios for cooperative and automated vehicles, SAE Technical Papers, April 2018.
- [12] P. Junietz, F. Bonakdar, B. Klamann and H. Winner, "Criticality Metric for the Safety Validation of Automated Driving using Model Predictive Trajectory Optimization," 2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Maui, HI, 2018, pp. 60-65
- [13] Garson, G. D. (2008). Discriminant function analysis. Archived from the original on 2008-03-12. Retrieved 2008-03-04
- [14] Rao, R. C. (1948). "The utilization of multiple measurements in problems of biological classification". Journal of the Royal Statistical Society, Series B. 10(2): 159–203.
- [15] Morris, M. D. (1991). "Factorial sampling plans for preliminary computational experiments", Technometrics, 33(2), 161-174.
- [16] Ali Ayoub, Wilfried Pflingsten, Luca Podofillini, Giovanni Sansavini, "Uncertainty and sensitivity analysis of the chemistry of cesium sorption in deep geological repositories", Applied Geochemistry, Volume 117, 2020, 104607, ISSN 0883-2927,
- [17] N. Wiener, "The homogeneous chaos," American Journal of Mathematics, vol. 60, no. 4, pp. 897-936, 1938.
- [18] Ernst, Oliver G., Mugler, Antje, Starkloff, Hans-Jorg, and Ullmann, Elisabeth, "On the convergence of generalized polynomial chaos expansions," ESAIM: M2AN, vol. 46, no. 2, pp. 317-339, 2012.
- [19] S. S. Mahmud, L. Ferreira, M. S. Hoque, and A. Tavassoli, "Application of proximal surrogate indicators for safety evaluation: A review of recent developments and research needs," IATSS Research, vol. 41, no. 4, pp. 153- 163, 2017.
- [20] E. Torre, S. Marelli, P. Embrechts, and B. Sudret, "Data-driven polynomial chaos expansion for machine learning regression," Journal of Computational Physics, vol. 388, pp. 601-623, 2019.
- [21] B. Sudret, "Global sensitivity analysis using polynomial chaos expansions," Reliability Engineering System Safety, vol. 93, no. 7, pp. 964- 979, 2008. Bayesian Networks in Dependability.
- [22] Sudret. B., "Uncertainty propagation and sensitivity analysis in mechanical models a contribution to structural reliability and stochastic spectral methods," 2007.
- [23] F. Schuld, S. Ulbrich, T. Menzel, A. Reschka, and M. Maurer, "Defining and substantiating the terms scene, situation, and scenario for automated driving," 09 2015.
- [24] www.pegasusprojekt.de
- [25] A. Dosovitskiy, G. Ros, F. Codevilla, A. López and V. Koltun, "CARLA: An open urban driving simulator", Conference on Robot Learning (CoRL), 2017.
- [26] S. S. Mahmud, L. Ferreira, M. S. Hoque, and A. Tavassoli, "Application of proximal surrogate indicators for safety evaluation: A review of recent developments and research needs," IATSS Research, vol. 41, no. 4, pp. 153 – 163, 2017.
- [27] P. Nitsche, "Safety-critical scenarios and virtual testing procedures for automated cars at road intersections," 8 2018.
- [28] "Autonomous Vehicle Collision Reports." California DMV, 17 Aug. 2021, www.dmv.ca.gov/portal/vehicle-industry-services/autonomous-vehicles/autonomous-vehicle-collision-reports/.

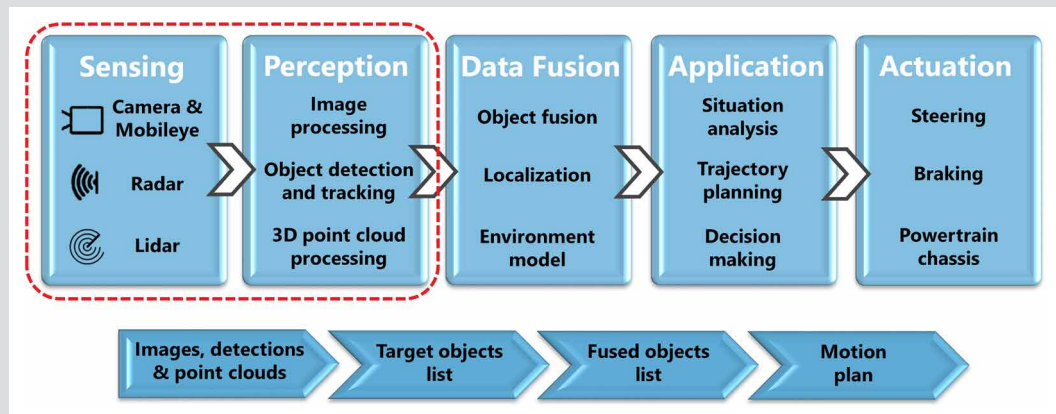
Sensing and Perception in Automated Driving

C. Hohl
D. Milojevic
M. Elser

Sensing and perception play a crucial role in the Automated Driving (AD) stack, as they provide the relevant information from the environment (Figure 1). As part of the «Automated Driving – Sen-

sor Testing Vehicle” project, we are evaluating the performance of AD sensors during real-world driving on a test track at the Empa campus in Dübendorf. Sensing and perception uses a variety of sensor technologies, such as cameras, radar or lidar, to capture real-time information on the vehicle’s surroundings. Objects surrounding the car can be detected and tracked using data processing. The data collected from the different sensors is combined by data fusion, then processed in real-time to create a comprehensive depiction of reality. Algorithms use this depiction to analyse the situation, plan possible trajectories and determine the action to be taken (steering, braking, etc.). Our research project focuses on the first two steps of this process, sensing and perception, which we describe in greater detail on the next page.

Figure 3: AESA radar working principle (Source: [1]).



Sensing

Sensing is the first task in automated driving. It aims to capture the necessary information on the vehicle's surroundings in real time. Since different sensors are able to capture different information, a combination of sensors is usually employed on automated vehicles (AVs).

Radar

Radar (Radio Detection and Ranging) is a remote sensing technology that uses radio waves to determine the range, angle and/or velocity of objects. A radar system consists of a transmitter, a transmitting antenna, a receiving antenna (often the same antenna as the one used for transmitting), a receiver and a processor. A radar system emits radio waves in a predetermined direction. When these radio waves hit an object, some of the energy is reflected back to the transmitter (Figure 2). The reflections received by the transmitter are then processed. The receiver can only detect an object if it receives a certain amount of power from it. The power received from a target at a certain distance can be described by the radar equation, which shows that the power received from a target declines with the 4th power of the distance to the target. Therefore, 16 times more power is needed to double detection range.

Traditional radars use a fixed-shape antenna with a fixed-antenna pattern/radar beam. In contrast, Active Electronically Scanned Array (AESA) radars consist of multiple small solid-state transmit/receive modules (Tx/Rx modules). By actively controlling the phase and frequency of each transmitter (Tx), the radar beam can be electronically steered to point in different directions without the need to move the antenna (Figure 3). Instead of just one single-frequency beam, an AESA radar can also use multiple smaller sub-beams, each potentially at a different frequency. Similarly, adjusting the phase of each individual receiver (Rx) signal before summation makes it possible to steer the reception beam. An alternative approach to reception is to sample each individual receiver signal at a suf-

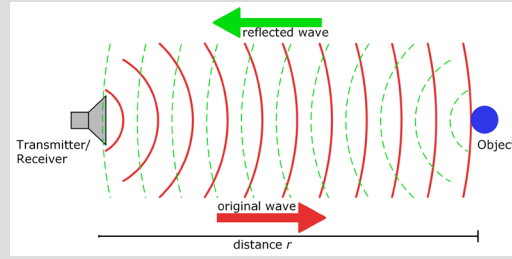


Figure 2: Basic radar working principle (Source: [1]).

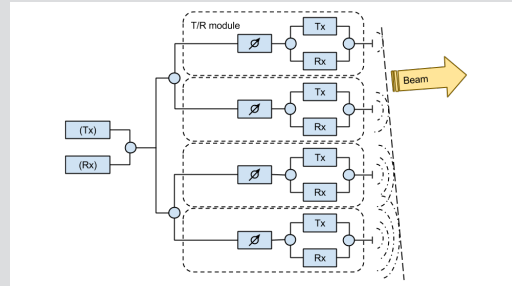


Figure 3: AESA radar working principle (Source: [1]).

ficiently high bandwidth to be able to perform digital beam forming. This makes it possible to steer the reception beam in multiple directions at the same time and therefore to detect multiple targets simultaneously.

Radar sensors for automotive applications are typically divided into two categories: frequency modulated continuous-wave (FMCW) and pulse radar. They typically use frequencies of 24, 77 or 79 GHz, known as millimetre wave (MMW). A continuous wave transmitter generates a continuous signal of frequency f_t , which is radiated by the antenna. Reflection from a moving object creates an echo, albeit at a different frequency owing to the Doppler effect. The frequency received from an approaching target is higher than the transmitted one and vice versa. To measure the range, a radar must be able to determine the time between transmission and reception. A continuous wave radar accomplishes this by frequency or other modulation techniques, which enable it to reconstruct the time of flight from the signal received. By contrast, pulse radar transmit only short pulses and wait for reflections. A pulse radar calculates the range from the time of flight and the radial velocity of the target from the Doppler frequency shift.

Figure 3: AESA radar working principle (Source: [1]).



Our AD testing vehicle is equipped with a Delphi (electronically scanning radar) ESR 2.5. The ESR 2.5 is a 76.5 GHz, solid-state single radar system with an electronically steered beam and pulse-Doppler signal processing. The ESR multimode radar provides simultaneous measurements of a wide field of view at mid-range and a narrow field of view at long range

Lidar

Lidar (Light Detection and Ranging) is a remote sensing technology that uses laser light to measure distances. An object is illuminated with a laser pulse and the reflected light is measured. The distance to the object is then calculated from the time that elapses between transmission and reception. By changing the horizontal and vertical direction of the laser, a 3D-lidar can scan the surrounding space, creating a 3D point cloud. Most lidars have a much higher horizontal than vertical angular resolution, which results in the typical contour lines that can be seen in a top view visualization (see Figure 5).

Figure 5: Visualization of a point cloud from a Velodyne VLP-16 3D lidar.

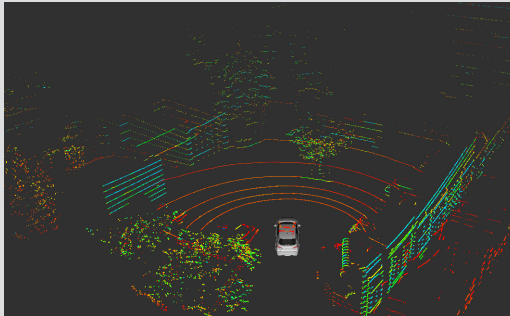


Figure 6: Working principle of a spinning 3D-lidar (Source: [2]).

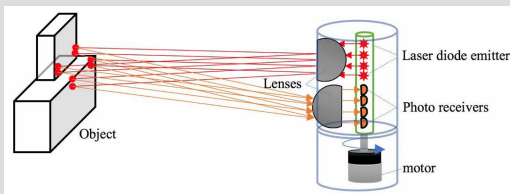
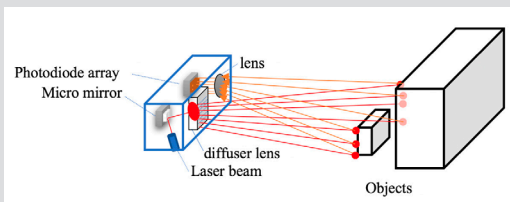


Figure 7: Working principle of a MEMS lidar (Source: [2]).



The vertical resolution of a lidar is determined by the number of channels it has and by its vertical field of view. Each channel consists of a laser emitter and detector pair at a fixed elevation angle relative to the horizontal sensor plane. Today, horizontal scanning usually involves a rotating mirror that simultaneously deflects the laser beam from all channels in the desired direction (Figure 6). Horizontal resolution is therefore determined by the speed at which the mirror rotates and by the number of measurements per second. In view of their complex mechanical setup, spinning lidars are quite expensive and have a relatively short lifetime.

To eliminate the need for moving mechanical parts, many companies are now working on solid-state lidars. Like phased array radars, solid-state lidars contain a large number of optical emitters, each of which can be controlled individually. By carefully adjusting the emission pattern, the resulting beam can be focused and steered in the desired direction without the need for moving mechanical parts.

Micro-Electro Mechanical System (MEMS) lidars use a different approach (Figure 7), whereby an array of micro mirrors is used to steer the laser beam into the desired direction.

Today's state-of-the-art lidar systems use laser light at a wavelength of either 905 or 1550 nanometres (nm). Both wavelengths have their advantages and disadvantages, such as different water absorptions. Therefore, trade-offs have to be made in terms of performance, safety and cost.

Mounted on the front bar of the roof rack of our AD testing vehicle is a Velodyne VLP-16-A LiDAR Puck [3]. This 16-channel spinning mirror lidar uses a 905 nm wavelength, class 1 laser. It has a range of 100 m and provides a full 360° horizontal and $\pm 15^\circ$ vertical field of view.

Camera

A digital camera is an optical device that produces images by capturing visible or infrared light. It consists of lenses that focus light from a scene and an imaging sensor (Figure 8) to capture that light. The imaging sensor consists of a 2D array of light-sensitive elements which capture photons and produce an electrical signal that is proportional to the number of photons captured. The two main types of imaging sensor are the charge-coupled device (CCD) and the active-pixel sensor/complementary metal oxide semiconductor (CMOS). For a long time, CCD sensors were superior to CMOS in terms of image quality, but this is no longer true following massive improvements and innovations in CMOS technology [4].

Standard imaging sensors capture light in the same visible light range as the human eye. The visible light range is further divided into three colour bands (red, green and blue), each of which is detected separately. In addition to RGB imaging sensors, there are also imaging sensors that detect light in the near infrared range.

For use in automated vehicles, high-resolution cameras are combined with computer vision algorithms that extract information from the images generated by the cameras (Figure 9).

Our AD testing vehicle features a Mobileye 630 camera mounted behind the front windscreen. The camera contains an EyeQ2 Image Processing Chip with Mobileye's image processing algorithms [6], which detect lanes, traffic signs, vehicles, cyclists and pedestrians and measure the distance to those objects.

Perception

Whereas sensing is the task of measuring the environment, perception involves using sensor data to understand the vehicle's surroundings. Perception in ADs involves several functionalities, which are described in detail below.

Detection and classification

Being able to detect objects is an essential feature of all automated vehicles. Objects can usually be detected from camera images, radar data and lidar point clouds. Objects that typically have to be detected include not only vehicles and pedestrians, but also other obstacles such as trees, traffic lanes, speed signs, traffic lights and many more. Once an object has been detected, it needs to be classified. Classifying means assigning a class label to each object detected. Figure 9 shows an example of an image with bounding boxes around the objects detected using different colours for each object class,

Objects from camera images are usually detected and classified using either deep learning methods [7], [8], [9] or classical edge detectionbased computer vision methods [10]. Real-time object detection, especially from camera images, is an area of very active research both in academia and industry, and a lot of progress has been made in the last decade thanks to improved algorithms and increased computational power. Classical and machine learning methods can be also be used to detect

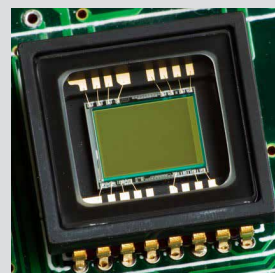


Figure 8: CCD imaging sensor.

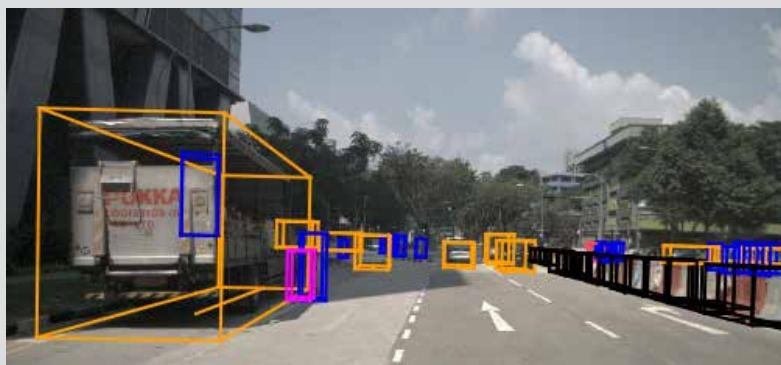


Figure 6: Working principle of a spinning 3D-lidar (Source: [2]).

and classify objects from lidar point clouds [11], [12], [13], [14]. Lastly, radar can also be used to detect and track objects, but cannot usually provide classification information.

Distance evaluation

Distance evaluation is the process of determining distances between objects. Ranging sensors such as lidar and radar measure distances directly. With passive sensors, such as cameras, there are several ways of estimating distance:

- Geometry-based
 - Structure from motion (estimate 3D structure from a series of 2D images)
 - Infer distance from geometry of single image
- Deep-learning based
- Sensor-based: RGB-D sensor detects pixel level depth directly

As usual, the different approaches come with their advantages and disadvantages. For example, this paper [15] by Mobileye describes two approaches to geometry-based range estimation. In the first, the vehicle width in the image space is detected and the distance to the vehicle is computed using pinhole-camera geometrics. Since vehicle width varies a lot in real life, this can induce large errors in distance estimation. The second approach involves detecting the bottom line of the vehicle (point of contact with the road) and the distance to the vehicle is inferred from the distance to the camera horizon, again using pinhole-camera geometrics. However, this approach is prone to errors at varying road gradients.

Tracking

Tracking is the process of following moving objects. Many applications – trajectory planning, for example – often require the position, velocity and instance of every object at a fixed update rate. Object tracks are obtained by means of a filter that uses object detection and localization data. Designing a filter involves many challenges, such as noisy sensor data, failed detections, false detections and unsynchronized sensor data. Moreover, not every sensor can provide all the necessary data for this application. For example, an object's velocity cannot be determined from a single camera image and tracking filters have to estimate this

data in this case. Tracking uses a dynamic filter to smooth out the raw detection data, estimate the missing data and extrapolate/interpolate between detections.

Within any multi-object tracking filter – i.e. a filter which can track multiple objects simultaneously – there is a crucial processing step in which all the raw detections need to be correlated to the existing tracks to find the best matches, i.e. to figure out which detection belongs to which track. Once the detections have been associated with the existing tracks, the tracks are updated using the new data from the detections. Of course, if no suitable track can be found for a detection, a new track is initiated.

Common filter designs for object tracking include Kalman filters and their variations, and particle filters to name but two. The choice of the filter depends on requirements and the available computational power.

Localization

Like human drivers in conventional cars, AD vehicles need to know their absolute position in order to navigate to their target location. A standard GNSS position with an accuracy in the order of a couple of metres is sufficient for this purpose. Moreover, human drivers rely on vision-based local localization for path following, i.e. detecting traffic lanes and street boundaries and their position relative to them. Similarly, many AD vehicles also rely on very accurate absolute localization in the centimetre range and use similarly accurate, detailed street maps. Lidar localization is a very promising approach to achieving such accurate localization, especially in urban environments, since it delivers an accuracy in the required cm range, similar to a differential or RTK GNSS, and does not suffer from signal loss or multipath problems like GNSS. For this reason, lidar localization could also act as a backup and provide redundancy when GNSS positioning methods are lost or fail.

Lidar localization works by comparing the current point cloud to a 3D map (which is usually predefined) and finding the map position where the current point cloud fits best [16]. Several different algorithms are available, e.g. iterative closest point (ICP) and normal distribution transform matching (NDT matching) [17]. Research into deep learning-based lidar localization methods has also recently begun [16].

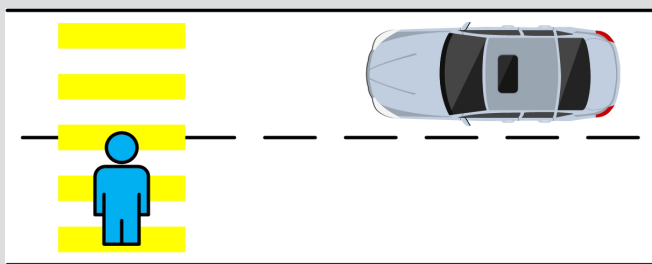


Figure 10: Pedestrian crossing a street as an example of a testing scenario.

Sensor testing

The «Automated Driving – Sensor Testing Vehicle» project is focusing on scenario-based sensor testing. The scenario-based testing approach involves breaking automated driving down into typical individual traffic situations and by doing so aims to reduce the infinite amount of possible driving situations into a finite set of scenarios to be tested. This finite number of tests can be performed in simulation, closed-track testing or on-road testing. The advantage of this approach is that we can focus on critical situations without spending test time on the easy tasks. The main challenge inherent in this approach is that it assumes that if the AV passes a given scenario successfully, it will pass other similar scenarios as well [18]. While humans are very good at this, it is hard to prove the same thing for an AV.

We built a test track at the Empa campus in Dübendorf, where we can perform real-world scenario-based tests by setting up different testing scenarios and conducting repeated tests under semi-controlled conditions. Prior to each test, we

define which functionality of the sensor or AV we want to test and the scenario in which this functionality will be tested. For example, if we want to test the reliability of camera-based pedestrian detection, we could define a testing scenario in which the car drives along the test track while a pedestrian crosses in front of the vehicle.

We then define performance metrics describing how we evaluate the performance of each sensor for a given functionality in a given scenario. For the pedestrian detection scenario described above, a classic example of such a performance metric would be the false negative rate, i.e. how many pedestrians the sensor (and algorithm) failed to detect in areas in which there was a pedestrian.

Object detection performance is evaluated using annotated ground truth data. Ground truth is usually the human eye and the data often has to be annotated manually.

As part of the project, we tested AD sensor performance in several scenarios and under different weather and environmental conditions (Figure 11).



Figure 11: Pictures from the test track in Dübendorf in different weather conditions (sun, rain, fog and snow).

Results

Figure 12 shows an example of the results that we obtained from scenario-based testing. Specifically, it shows the Mobileye camera's false negative rate for pedestrian detection in sunny weather conditions as a function of the distance between the vehicle and the pedestrian.

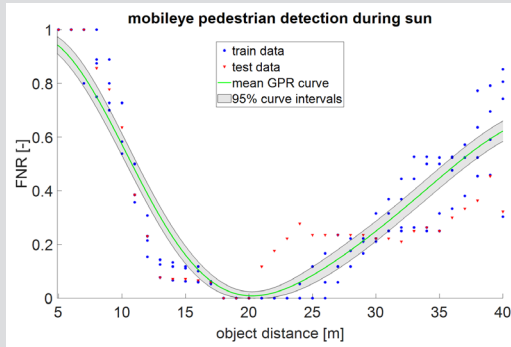


Figure 12: Mobileye pedestrian detection FNR as a function of object distance in sunny weather conditions.

The single data points represent the FNRs obtained from different test repetitions. The blue circles (train data) are used to fit the FNR curve with a Gaussian process regression, while the red triangles (test data) are used to validate the FNR curve. The test data is generated from an independent experiment in order to avoid dependencies between train and test data. The resulting mean FNR curve is represented by a green line and the 95th and 5th percentiles with the two black lines respectively. The grey area represents the uncertainty of all possible FNR curves.

The FNR curve for pedestrian detection using the Mobileye camera is parabolic in shape with a minima at around 20 m distance. FNR increases with distance because the camera gradually captures less information from the objects, i.e. the greater the distance, the smaller the number of pixels from the object in the image, which impedes detection. The poorer performance for smaller distances is less intuitively obvious, because closer objects should be represented by more pixels. We assume that the reason for decreasing performance at smaller distances might be related to the higher relative tangential velocity between the camera and the object. This higher tangential velocity, which is the result of vehicle motion, can produce motion blur in the camera images. Motion blur distorts the objects in an image, making them harder to detect[19]. Unfortunately, since we cannot access the raw images produced by the Mobileye camera, we cannot prove that motion blur actually occurs at shorter distances, but these two effects in combination could explain the parabolic curves.

Comparing the FNR curves from all testing conditions enables us to determine the effects of adverse weather conditions on sensor performance. Higher FNRs were obtained for all distances in rainy and snowy conditions than in sunny conditions. This can be explained by the additional noise in the camera image created by the raindrops/snowflakes, which impedes object detection. In addition to weather-related effects, we also found that the Mobileye camera's object detection performance differed according to object type and size.

Conclusion

As part of this project, we have developed methodologies to investigate the performance of AD sensors using function-scenario-based tests. Function-scenario-based testing offers the same advantages as real-world AD testing, i.e. the sensor hardware is tested during real driving and not by mathematical models of the sensors, as is the case with simulations. Moreover, the sensors take real-world measurements of the instead of being spoofed as they are in vehicle-in-the-loop or hardware-in-the-loop testing systems. Since the scenarios are clearly defined, the tests are repeatable and the relevant testing specifications, such as weather conditions or object distance, can be extracted. Moreover, the AD perception functions (e.g. object detection or object tracking) are tested separately, permitting better assessment of weaknesses and failure origins. Combining testing with laboratory experiments allowed us verify results from field tests in a laboratory environment and vice versa. In addition to the testing procedures, we also produced specific results for the sensor set installed on our vehicle platform, comprising a Mobileye camera, a Delphi ESR radar and a Velodyne VLP-16 lidar.

Acknowledgments

This work was funded by Swiss Federal Roads Office (FEDRO) [project no. ASTRA 2019/004] and Innosuisse / SCCER Mobility – Digitalization Action Plan. The authors acknowledge B. Gerster and their project partners: ETH Zurich, Federal Institute for Metrology METAS, Axa Versicherungen, embotech, Toyota / Lexus, Schweizer Paraplegiker-Stiftung and Touring Club Schweiz for their support.

References

- [1] Wikimedia Commons, «commons.wikimedia.org,» [Online]. [Accessed 05 12 2019].
- [2] F. Rosique, P. J. Navarro, C. Fernández and A. Padilla, «A Systematic Review of Perception System and Simulators for Autonomous Vehicles Research,» *Sensors*, 2019.
- [3] Velodyne LiDAR, Inc., VLP-16 User Manual, San Jose, CA, USA, 2017.
- [4] Teledyne DALSA, «The Evolution of CMOS Imaging Technology,» Canada, 2011.
- [5] H. Caesar, V. Bakinti, A. H. Lang, S. Vora, V. E. Liong, Q. Xu, A. Krishnan, Y. Pan, G. Baldan and O. Beijbom, «nuScenes: A multimodal dataset for autonomous driving,» *arXiv preprint arXiv:1903.11027*, 2019.
- [6] AutonomouStuff, *Mobileye Startup Guide*, 2017.
- [7] I. Laina, C. Rupprecht, V. Belagiannis, F. Tombar and N. Navab, «Deeper Depth Prediction with Fully Convolutional Residual Networks,» in *IEEE International Conference on 3D Vision (3DV)*, 2016.
- [8] H. Fu, M. Gong, C. Wang, B. K and D. Tao, «Deep Ordinal Regression Network for Monocular Depth Estimation,» in *CVPR*, 2018.
- [9] S. Ren, K. He, R. Girshick and J. Suan, «Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks,» *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2015.
- [10] R. Szeliski, *Computer Vision*, Springer, 2010.
- [11] X. Chen, H. Ma, J. Wan, B. Li and T. Xia, «Multi-View 3D Object Detection Network for Autonomous Driving,» in *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2017.
- [12] Y. Zhou and O. Tuzel, «VoxelNet: End-to-End Learning for Point Cloud Based 3D Object Detection,» *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2018.
- [13] C. Qi, W. Liu, C. Wu, H. Su und L. Guibas, «Frustum PointNets for 3D Object Detection from RGB-D Data,» *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2018.
- [14] S. Shi, X. Wang und H. Li, «PointRCNN: 3D Object Proposal Generation and Detection from Point Cloud,» *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2019.
- [15] G. P. Stein, O. Mano und A. Shashua, «Vision-based ACC with a Single Camera: Bounds on Range and,» in *IEEE IV2003 Intelligent Vehicles Symposium. Proceedings (Cat. No.03TH8683)*, Columbus, OH, USA, 2003.
- [16] X. H. M. Elhousni, «A Survey on 3D LiDAR Localization for Autonomous Vehicles,» in *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Las Vegas, 2020.
- [17] P. Biber und S. W., «The Normal Distributions Transform: A New Approach to Laser Scan Matching,» in *Conference: Intelligent Robots and Systems*, 2003.
- [18] S. Shalev-Shwartz, S. Shammah and A. Shashua, «On a Formal Model of Safe and Scalable Self-driving Cars,» *Mobileye*, 2017.
- [19] C. Michaelis, B. Mitzkus, R. Geirhos, E. Rusak, O. Bringmann, A. S. Ecker, M. Bethge und W. Brendel, «Benchmarking robustness in object detection: Autonomous driving when winter is coming,» 2019.
- [20] Delphi, *Delphi Electronically Scanning RADAR Datasheet*.
- [21] AutonomouStuff, «www.autonomoustuff.com,» [Online]. Available: <https://autonomoustuff.com/product/quantum-storage-solution-kits/>. [Zugriff am 06 12 2019].

From development to road approval and organized experience feedback in Europe

M. Cristina Galassi¹
Antony Lagrange²
Biagio Ciuffo¹

1. Introduction

Safety certification of road vehicles currently relies on physical verification and testing based on a limited number of structural fatigue tests under clearly defined worst-case conditions. Such an approach is well established and widely accepted as part of the homologation process for conventional human-driven vehicles. In the near future, automated vehicles (AVs) will also become subject to type approval prior to market introduction, and physical testing alone will no longer be enough to assess vehicle safety performance. Indeed, one of the most pressing challenges for regulators at present is how to define safety requirements and develop suitable safety assessment methods for AVs.

The Joint Research Centre (JRC), as the European Commission's science and knowledge service, is supporting the Directorate General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs (DG GROW) in the development of the new EU Type Approval Framework for Automated Vehicles.

2. EU strategy for connected and automated mobility

In May 2018, the EC completed its agenda for safe, clean, connected and automated mobility with the release of the third mobility package [1], which included a dedicated communication on Connected and Automated Mobility [2]. The strategy is based on three main pillars:

1. Developing key technologies and infrastructures,
2. Ensuring automated and connected mobility is safe,
3. Addressing societal concerns, in particular jobs, skills and ethical issues.

Sustainable and smart mobility is also a contributing pillar of the latest European Green Deal Communication [3] for more efficient and cleaner transport. JRC is carrying out research activities on the Regulation and Impact of Connected and Automated Mobility (under the RICAM project) in order to provide independent scientific advice and support for EU policy in all the fields mentioned above.

Since 1998, passenger cars have had to obtain type approval before they are granted access to the market. This process is governed by fully harmonized requirements such that homologation issued by a single Member State (MS) Authority is then valid across all EU MSs. At present, AVs can only be homologated under EU type approval legislation [4] by means of the exemption procedure for new technologies or new concepts (described in Art. 39).

¹ European Commission, Joint Research Centre (JRC), Ispra, Italy

² European Commission, Directorate General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs (DG GROW), Brussels, Belgium

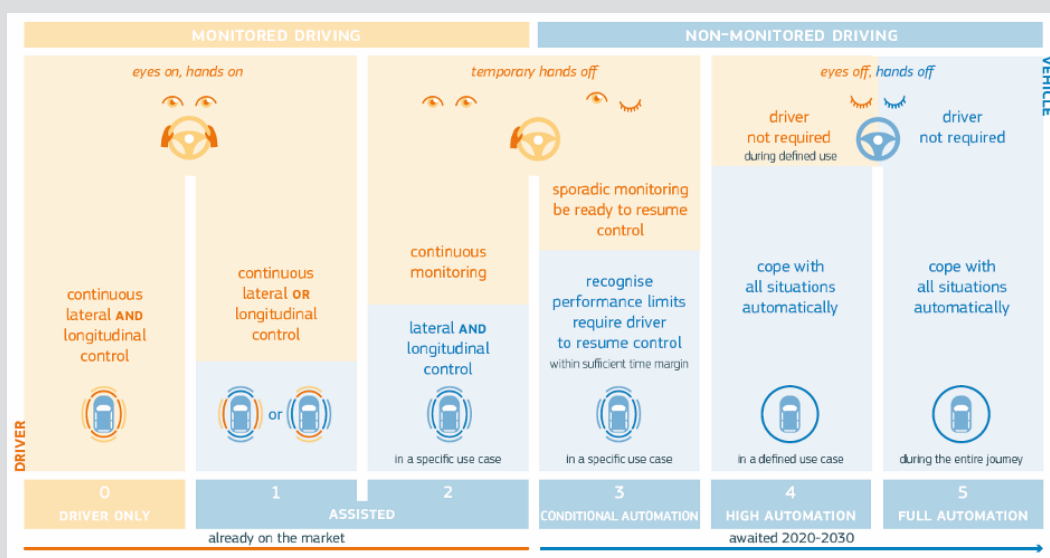


Figure 1. SAE driving automation levels (authors' diagram [7]).

In accordance with the strategy set out in the 2018 Communication [2] to ensure an internal market for the safe uptake of automated mobility, the EC developed Guidelines [5] together with MSs to harmonise the application of the exemption procedure for EU approval of automated vehicles. The guidelines were endorsed by the Technical Committee on Motor Vehicles (TCMV) in 2019 and are publicly available. They aim to provide guidance to Type Approval Authorities on the ad-hoc assessment of automated vehicles and to enable coordination across EU countries. The guidelines focus on conditional automation, meaning vehicles that can drive autonomously in a limited number of clearly defined situations and in accordance with automation levels 3 and 4 (see Figure 1) as defined by the Society of Automotive Engineers (SAE) International [6]. These vehicles are already being tested and are expected to be commercially available in the next few years.

The issuing of the EC Guidelines is a contribution to the progressive approach adopted to regulating connected and automated vehicles (CAVs) in the EU, alongside support for large-scale testing across Europe, the adoption of the new EU vehicle General Safety Regulation (GSR), and the development of a new approach for the safety certification of automated vehicles.

In 2019, the EC established the Single Platform for Cooperative, Connected, Automated and Autonomous Mobility (CCAM) in order to address the coordination of CCAM research, testing, piloting and pre-deployment activities in the EU. It is a matter of fact that large-scale testing and pre-deployment investigations can contribute to our

knowledge of the safety performance of CAVs as well as their interaction with other road users and the infrastructure. This subject is specifically addressed by Working Group 4 (WG4). Starting from a review of recent and current road testing and pre-deployment activities focusing on road safety, WG4 identified lessons learnt, shortfalls and legal issues that need to be considered as part of efforts to define a common safety assessment methodology for CAVs and road infrastructure. The end goal is to establish road exemption procedures for CCAM testing and develop regulation or certification to allow pre-deployment of CCAM.

The new GSR [8], which comes into force from July 2022 for new vehicle types, was proposed as part of the 3rd Mobility Package [1] in 2018. For the first time, it addresses the specific concerns of vulnerable road users and introduces the latest advanced safety systems as standard equipment in new vehicles. It also paves the way for driving automation, thus providing the legal framework for connected and automated driving.

As the task of driving transitions from the human driver to the AV, the vehicle will have to perform more tasks and will need more sensors, more software etc. This will increase complexity and the associated risks. As a consequence, new safety assessment methods are needed to complement the conventional physical testing performed using worst-case scenarios or on-road mileage accumulation (experts estimated that 100 million km of road driving would be necessary to statistically demonstrate that an AV is as safe as a human driver [9]). As explained in the next section, the new EU

approach to automated vehicle safety assessment is under development and will encompass analytical methodologies as well as different testing environments (e.g. virtual testing, proving ground and field tests) and organized experience feedback from real world operation.

3. New approach to the safety certification of automated vehicles

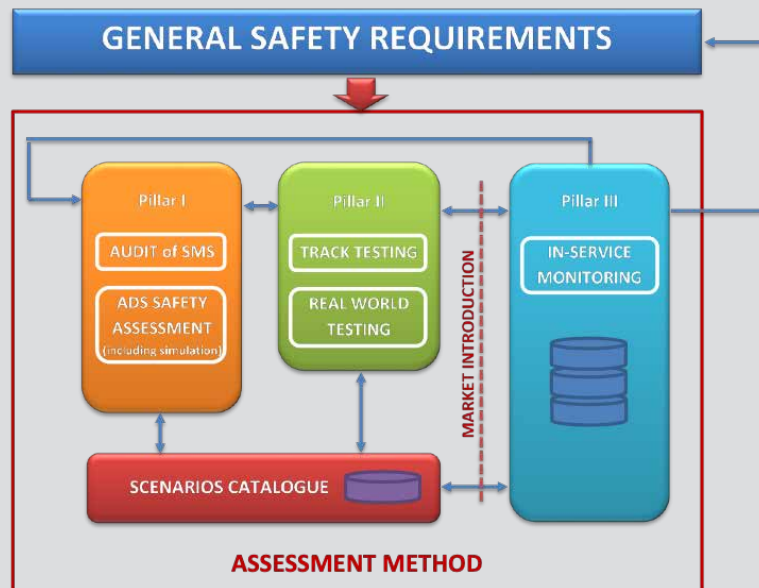
JRC is supporting DG GROW in the development of the new approach to AV safety certification at both EU and United Nations (UN) level [10]. This new assessment method consists of three main phases, or pillars: (1) Audit & assessment, (2) Verification testing, (3) In-service monitoring. As shown in Figure 2, each pillar is tightly linked to the others and to the scenarios catalogue, both delivering and receiving information in return.

The first pillar involves an AUDIT of the manufacturer's safety management process and an ASSESSMENT of vehicle safety by means of the demonstration submitted by the manufacturer (covering ADS design, development, validation and verification, data storage, etc.). The purpose of the process audit is to verify the fitness for purpose of the manufacturer's safety management system (SMS). The purpose of the product safety assessment is to verify that (1) the safety objectives are in line with legislative requirements and implemented in the design; (2) compliance has been demonstrated by means of performance-based tests (virtual, track and real-world testing) in normal and emergency conditions; and (3) the safety demonstration is duly documented in the report submitted to the Type Approval Authority.

JRC is proposing the use of a voluntary guide to assist manufacturers in preparing the safety documentation to be submitted for type approval. JRC is also proposing that this safety report be issued in successive steps, starting with the early development phase and continuing with updates throughout the vehicle type lifecycle if there are major modifications. Many questions have yet to be resolved, for example the new competences needed by the Authority and the transparency of the audit and assessment procedure, as well as the level of detail in the information to be provided and who should have access to that information.

The second pillar consists in verifying the AV's safety performance by means of PHYSICAL TESTING before the vehicle is placed on the market. To this end, the Authority could conduct track tests and public-road tests. Discussion is still ongoing on which approach is most suitable for verifying each specific scenario, and what are the criteria for selecting track testing rather than public-road testing. The obvious starting point is the vehicle capabilities to be verified: track testing can be used to test basic competences and critical situations in a controlled environment where there is no danger to other road users and where a certain degree of repeatability is possible (indeed track testing could also be used to validate simulation models). On the other hand, public-road testing will be the only way of verifying the AV's capability to merge with real-world traffic, drive smoothly and interact properly with real road users. JRC is working on the development of concepts for testing general validity and test procedures for speci-

Figure 2. EU Method for Automated Driving (source: authors' diagram).



fic use cases (i.e. highway chauffeur and shuttles/robotaxis). In particular, on-road testing presents many new challenges in terms of establishing the validity of the test and how to measure and evaluate the vehicle's «roadmanship» (its ability to drive on the road safely without creating hazards and responding well to hazards created by others [11]).

Given the complexity of AVs, assessment by the Authority cannot be limited to pre-launch approval, but must continue throughout the vehicle lifetime, tracking the necessary evolution of its real-world safety performance. The assumption is that the technology approved is deemed to be safe enough to operate on-road and start a process of continual improvement driven by feedback from the operational experience [12]. For this reason, the third and last pillar is IN-SERVICE MONITORING and reporting. This last phase will consist in retrospective analysis of crash and near-miss data from market operation. It will allow timely identification of anomalies compared to the pre-deployment safety assessment and ensure that manufacturers recognize and manage new unknown and unsafe scenarios [13]. Information sharing of lessons learnt from the analysis of incidents, accidents and near-miss events will allow continuous improvement of both technology and legislation. Finally, data collection from field operation will also provide useful information on the positive impact of driving automation on road safety. JRC is looking at other areas of transport where operational experience feedback has been established practice for decades (e.g. aviation, the railways and the maritime sector), at the same time evaluating which methodologies could be applied to automated vehicles and researching possible new solutions that are more suitable for the automoti-

ve sector.

Last but not least, the scenario catalogue will also play a fundamental role as a safety validation and assessment framework shared by manufacturers and authorities. Since it is clear that road driving cannot be used to demonstrate safety, the authorities and manufacturers need to have a shared understanding of what the most relevant traffic situations are that the AV needs to be able to safely deal with, and how its ability to do so can be demonstrated. For this reason, the scenario database will consist of a series of selected safety-relevant scenarios (traffic situations, failure modes, weather conditions, etc.) that are representative of real-world driving. This catalogue will provide manufacturers with a minimum baseline (non-exhaustive inventory) of scenarios that should be considered for the safety validation of AVs. This same catalogue will then also provide the framework for choosing testing scenarios at the approval phase.

4. State of play

The assessment method described above is generally applicable as it is independent of the automated driving application in question. Nevertheless, it will require a certain amount of adaptation for practical implementation, depending on the specific use case addressed (e.g. for identifying relevant scenarios and defining testing procedures). The first step in putting the general concept into practice was to select relevant use-cases. By means of dialogue with the stakeholders (see also [14]), JRC and DG GROW identified the most likely roadmap for AD deployment and focused on the forthcoming technologies as shown in Figure 3: highway chauffeur (SAE Level 3) for motorway applications and shuttles/robotaxis (SAE Level 4) for urban applications.

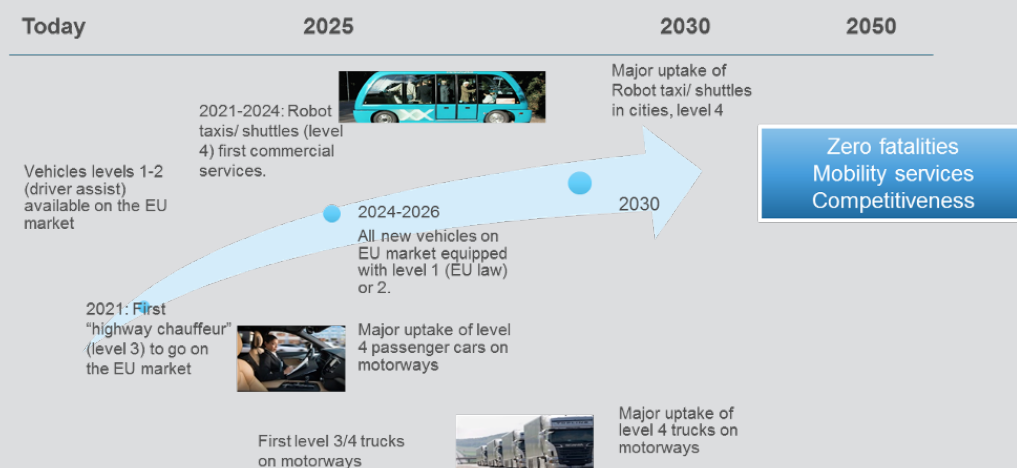


Figure 3. EU vision on automated driving deployment (source: DG GROW).

Table 1. Current status of EC regulatory efforts for AVs at EU and UN level.

	General Framework	Motorway Applications	Urban Applications
EU	<p>EC Guidelines (Feb 2019) Approval of AVs under EU exemption procedure</p>		<p>MVWG-ACV (End 2021) Implementing Act on shuttles and robotaxis (valet parking, commercial vehicles in confined areas)</p>
UN	<p>UNR155 on Cybersecurity (June 2020)</p> <p>UNR156 on OTA updates (June 2020)</p> <p>FRAV IWG (?) Functional Requirements (EC contributing)</p> <p>VMAD IWG (?) Validation Methods (EC chairing SG2 and SG3)</p> <p>ADAS Task Force (End 2021) (EC co-chairing)</p>	<p>UNR157 on ALKS low speed (June 2020)</p> <p>UNR157 SIG (End 2021) Amendment to extend scope of UN R157 to lane changing and high speed (EC co-chairing)</p>	

The EC regulatory effort on these two use cases is being shaped at both EU and UN level. The Commission and MSs are closely involved in the UN discussion. Indeed many pieces of EU legislation are being replaced by UNECE regulations in a bid to remove legislative barriers to the creation of a global automotive market and boost the EU's industrial competitiveness.

Table 1 summarizes current legislative efforts to regulate AVs at both EU and UN level. The legislative tools already available for AV approval are in green letters: the EC 2019 guidelines [5] for approval under the exemption procedure, the UN Automated Lane Keeping System (ALKS) Regulation (UNR157) [15] for highway low-speed applications (up to 60 km/h), together with the cybersecurity [16] and over-the-air (OTA) updates [17] regulations.

Ongoing and planned regulatory activities are in black letters. As shown in the table, the EC is co-leading the work of the Special Interest Group (SIG) on the amendment of UNR157 to deliver technical rules for highway chauffeur by Q1 2022. At the same time, the EC is also leading the regulatory effort of the Motor Vehicle Working Group – Automated and Connected Vehicles subgroup (MVWG-ACV) on urban shuttles and robotaxis at EU level. The aim of the MVWG-ACV is to deliver the new Commission Implementing Regulation on automated driving systems by Q1 2022. Other very important aspects addressed by the MVWG-

ACV are the applicability of current type approval regulatory acts to AVs and the need to align national/regional legislation (e.g. liability, traffic rules).

The EC is also contributing to the UN's ongoing work on AV safety requirements and validation methods, which is being carried out by the two UN Informal Working Groups (IWGs) on Functional Requirements for Automated Vehicles (FRAV) and Validation Methods for Automated Driving (VMAD) respectively. In particular, the EC is leading the work of VMAD subgroups number 2 (on simulation and virtual testing) and 3 (on auditing, assessment and in-service monitoring). The top-down approach adopted by FRAV and VMAD aims at establishing a general framework for AV safety evaluation that could be used as a reference both by manufacturers and by regulators. New input will be submitted at the February 2022 session of the Working Party on Automated/Autonomous and Connected Vehicles (GRVA) in the form of recommendations. No deadline has as yet been set for deliverables in form of regulatory text.

For the sake of completeness, it is also worth mentioning the ongoing regulatory effort on Advanced Driver Assistance Systems (ADAS). The EC is co-leading the work of the UN Task Force on ADAS, with the aim of simplifying UN Regulation No. 79 and developing a new UN ADAS Regulation (focus on ADAS systems up to of SAE Level 2) by the end of 2021.

5. Way forward

As described in the previous sections, the EC's priorities in terms of AV regulation for 2021 are:

- developing technical requirements for highway applications by amending UNR157 at UN level,
- developing technical requirements for urban applications by means of the Implementing Act on shuttles and robotaxis.

In the longer term, the Commission will continue to address other use cases, including trucks on motorways and in confined areas, valet parking, and also ADAS applications.

It is also expected that the UN will take care of regulating non-motorway applications, and this should be covered by the general approach being developed by the FRAV and VMAD IWGs, to which the EC will continue to contribute.

References

- [1] COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS EUROPE ON THE MOVE Sustainable Mobility for Europe: safe, connected, and clean - COM/2018/293 final, 2018.
- [2] COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE, THE COMMITTEE OF THE REGIONS On the road to automated mobility: An EU strategy for mobility of the future, COM/2018/283 final, 2018.
- [3] COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE EUROPEAN COUNCIL, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS The European Green Deal, COM/2019/640 final, 2019.
- [4] Regulation (EU) 2018/858 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 on the approval and market surveillance of motor vehicles and their trailers, and of systems, components and separate technical units intended for such vehicles, amending Regulations (EC) No 715/2007 and (EC) No 595/2009 and repealing Directive 2007/46/EC, 2018.
- [5] European Commission, Guidelines on the Exemption Procedure for the EU Approval of Automated Vehicles - Version 4.1, 2019.
- [6] SAE J3016: Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles, J3016_202104, 2021.
- [7] Alonso Repose, M. (Ed.), Ciuffo, B. (Ed.), Alves Dies, P., Ardente, F., Aurambout, J-P., Baldini, G., Baranzelli, C., Blagoeva, D., Bobba, S., Braun, R., Cassio, L., Chawdhry, P., Christidis, P., Christodoulou, A., Corrado, S., Duboz, A., Duch Brown, N., Felici, S., Fernández Macías, E., Ferragut, J., Fulli, G., Galassi, M-C., Georgakaki, A., Gkoumas, K., Grosso, M., Gómez Vilchez, J., Hajdu, M., Iglesias, M., Julea, A., Krause, J., Kriston, A., Lavallo, C., Lonza, L., Lucas, A., Makridis, M., Marinopoulos, A., Marmier, A., Marques dos Santos, F., Martens, B., Mattas, K., Mathieux, F., Menzel, G., Minarini, F., Mondello, S., Moretto, P., Mortara, B., Navajas Cawood, E., Paffumi, E., Pasimeni, F., Pavel, C., Pekár, F., Pisoni, E., Raileanu, I-C., Sala, S., Saveyn, B., Scholz, H., Serra, N., Tamba, M., Thiel, C., Trentadue, G., Tecchio, P., Tsakalidis, A., Uihlein, A., van Balen, M., Vandecasteele, I., The future of road transport - Implications of automated, connected, low-carbon and shared mobility, EUR 29748 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2019, ISBN 978-92-76-14318-5, doi: 10.2760/668964, JRC116644.
- [8] European Union, Regulation (EU) 2019/2144 of the European Parliament and of the Council of 27 November 2019 on type-approval requirements for motor vehicles and their trailers, and systems, components and separate technical units intended for such vehicles, as regards their general safety and the protection of vehicle occupants and vulnerable road users, 2019.
- [9] Winner, Hermann, and Walther Wachenfeld. "Absicherung automatischen Fahrens, 6." FAS-Tagung München, Munich 2013.
- [10] United Nations Working Party on Automated/Autonomous and Connected Vehicles (GRVA), New Assessment/Test Method for Automated Driving (NATM) - Master Document, ECE-TRANS-WP29-2021-61e, WP29 184th session, 22-24 June 2021.
- [11] Marjory S. Blumenthal, Laura Fraade-Blanar, Ryan Best, J. Luke Irwin, Safe Enough - Approaches to Assessing Acceptable Safety for Automated Vehicles, ISBN: 978-1-9774-0603-3, RAND Corporation, 2020.
- [12] Underwriters Laboratories, Standard for Safety for the Evaluation of Autonomous Products, ANSI/UL 4600, 2020.
- [13] International Standards Organization, Road vehicles — Safety of the intended functionality, ISO/PAS 21448:2019,2019.
- [14] European Road Transport Research Advisory Council (ERTRAC), Connected Automated Driving Roadmap, 2019.
- [15] United Nations, UN Regulation No. 157, Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to Automated Lane Keeping Systems, ECE/TRANS/WP.29/2020/81, 2020.
- [16] United Nations, UN Regulation No. 155, UN Regulation No. 155 - Cyber security and cyber security management system, E/ECE/TRANS/505/Rev.3/Add.154, 2021.
- [17] United Nations, UN Regulation No. 156, - Software update and software update management system, E/ECE/TRANS/505/Rev.3/Add.155, 2021.

Verantwortliche Gestaltung des autonomen Fahrens. Ethische Aspekte und ihre Relevanz

Armin Grunwald

1. Einführung und Überblick

Das hochautomatisierte bzw. autonome Fahren (Maurer et al. 2015)¹ ist in den letzten Jahren zu einem der beherrschenden Themen der öffentlichen Technikdebatten geworden. Fortschritte der Technik, das Vorpreschen amerikanischer Konzerne, die ersten Unfälle mit Todesfolge, die Einrichtung von Teststrecken nicht nur auf Autobahnen, sondern auch in Stadtgebieten, sowie Sorgen um die deutsche und europäische Automobilindustrie angesichts weltweiter Konkurrenz befeuern immer wieder diese Diskussion. Neben den wirtschaftlichen Aspekten spielen auch psychologische und kulturelle Fragen eine Rolle, ist doch das traditionelle Automobil in vielen Bevölkerungsgruppen

weiterhin zentrales Symbol für Freiheit und Wohlstand. Nach einem Hype der öffentlichen Debatte vor einigen Jahren ist die Aufmerksamkeit zwar abgeflaut, auch bedingt durch die Dominanz von Pandemiethematen. Angesichts der fortschreitenden technischen Entwicklung und der absehbaren Markteinführung von hochautomatisierten Fahrzeugen besteht jedoch kein Zweifel, dass ein Wiederaufleben zu erwarten ist.

In diesem Beitrag geht es vor allem um ethische Fragen des autonomen Fahrens und seiner Folgen, wie sie aus heutiger Sicht absehbar sind. Interessanterweise sind einige dieser Themen in das Zentrum der öffentlichen Debatte geraten, dabei vor allem die so genannten Ethik-Dilemmata und die Frage der Letztkontrolle angesichts möglicher Entscheidungen über Leben und Tod. Die öffentlich thematisierten und teils skandalisierten Ethikfragen sind freilich nicht gleichermassen relevant, auch verfehlen einige den eigentlichen Kern der Herausforderung. Daher möchte ich in diesem Beitrag neben einem überblickartigen Durchgang durch die ethischen Herausforderungen autonomen Fahrens (Teil 2) auch die beiden genannten Hauptthemen der öffentlichen Debatte in Bezug auf ihre Relevanz (Teil 3) und das dahinterstehende Problem der Verantwortungsverteilung (Teil 4) in den Blick nehmen.

Für die Überlegungen greife ich auf eigene Vorarbeiten (Grunwald 2015, Grunwald 2019a, Brändle/Grunwald 2019) und auf die Ergebnisse der Ethik-Kommission autonomes und vernetztes Fahren, deren Mitglied ich war, zurück. Diese Kommission wurde 2016 vom deutschen Ministerium für Verkehr und digitale Infrastrukturen eingesetzt und hat 2017 den Endbericht vorgelegt (Ethik-Kommission 2017). Ihre Einsetzung war eine Reaktion auf die in jenen Jahren ausgesprochen intensive öffentliche Debatte zum autonomen Fahren. Die Kommission war die erste nationale Plattform in Deutschland zur Analyse und Kartierung ethischer Fragen des autonomen Fahrens. Ihr Bericht dient weiterhin häufig als Referenzdokument, obwohl die Kommission aufgrund der Kürze der verfügbaren Zeit keine tiefgehende Untersuchung erarbeiten konnte.

¹ In diesem Kapitel werde ich nicht eigens die fünf Ebenen des automatisierten Fahrens unterscheiden. Die hier diskutierten ethischen Themen werden ab Stufe 3 relevant und nehmen an Relevanz mit den höheren Stufen zu, da jeweils mehr Befugnisse an die Technologie übergeben werden, beim autonomen Fahren (Stufe 5) vollständig.

2. Ethische Herausforderungen autonomen Fahrens

Das Automobil ist in der so genannten Wirtschaftswunderzeit der 1950er- und 1960er-Jahre zum Symbol für individuelle Mobilität und Freiheit schlechthin und zu einem zentralen volkswirtschaftlichen Faktor geworden. Auch wenn dieser Aspekt in der jungen Generation, vorwiegend in urbanen Räumen, an Bedeutung verliert, so ist Automobilität weiterhin von hoher Bedeutung im individuellen wie gesellschaftlichen Leben in Wirtschaft, Arbeitswelt, Alltag und Freizeit. Mobilität führt jedoch zu erheblichen nicht intendierten Folgen, vor allem zu Unfällen, Todesopfern und Sicherheitsproblemen sowie zu Umwelt- und Klimafolgen, die in ethischer Hinsicht erhebliche Probleme darstellen (Becker 2021). Auch die ungerechte Verteilung des Zugangs zu individueller Mobilität ist ein ethisches Thema. Mit autonomem Fahren sind verschiedene Erwartungen mit ethischem Hintergrund verbunden: mehr Sicherheit, mehr Zugangsgerechtigkeit für kranke, behinderte oder ältere Menschen, vor allem in ländlichen Gebieten, bessere Effizienz der Verkehrsführung und damit verbundene Reduzierung der Umweltbelastung sowie eine Erhöhung der Lebensqualität durch die Möglichkeiten, Lebenszeit im Auto für andere Zwecke zu nutzen.

Neben diesen ethisch grundsätzlich positiv zu würdigenden Erwartungen ist autonomes Fahren jedoch auch mit Implikationen, nicht intendierten Folgen und Risiken konfrontiert, die in ethischer Hinsicht Fragen aufwerfen und auf Herausforderungen an verantwortliche Gestaltung hinweisen. Dabei spielt die Notwendigkeit der Nutzung digitaler Technologien, vor allem der künstlichen Intelligenz (KI) eine besondere Rolle. Sie ist erforderlich aufgrund der hohen Anforderungen an schnelle Auswertung komplexer Datenbestände, der Notwendigkeit von quasi Echtzeitreaktionen und des Wunsches nach möglichst effektiv lernenden Systemen. Daher sind neben den immensen technischen Herausforderungen eine Fülle ethischer Fragen sowie zur Ermöglichung eines gerichtsfesten Betriebs auch rechtliche Aspekte zu beachten. Sie lassen sich – freilich nicht überlappungsfrei – in individuelle (2.1) und sozialetische (2.2) Themen unterteilen.

2.1 Individualethische Fragen autonomen Fahrens

In diesem Feld steht die direkte Wechselwirkung von Menschen mit autonomen Fahrzeugen im Mittelpunkt. Die Themen gehören zu dem grossen Feld der ethischen Herausforderungen an neue Mensch-Maschine-Konstellationen.

(1) Notfallsituationen

Auch hochautomatisierte oder autonome Fahrzeuge werden aufgrund von technologischen Mängeln, unvorhersehbaren Situationen oder auch systemischen Rückkopplungseffekten Unfälle nicht komplett verhindern können. Selbst bei vollständiger Herausnahme des Menschen aus dem Verkehrsgeschehen bzw. bei seiner Beschränkung auf das Dasein als Frachtgut werden Unfälle nicht ausgeschlossen werden können. Beinahe-Unfälle und Notsituationen, also Fälle eines drohenden Unfalls bzw. eines Verlusts der Kontrolle über die Situation, können sowohl menschlichen Lenkenden als auch dem Bordcomputer unterlaufen. Falls die Notsituation einer lenkenden Person widerfährt, stellt sich die Frage, ob das technische System in die Lage versetzt und berechtigt werden soll, auch gegen den Willen des Menschen die Kontrolle zu übernehmen, um die Notfallsituation zu entschärfen. Dieser Fall führt zur Frage der Letztkontrolle, die weiter unten behandelt wird. Umgekehrt kann der Bordcomputer in Gefahr geraten, die Kontrolle während der Fahrt zu verlieren, wenn das System zum Beispiel diagnostiziert, dass Systemkomponenten ausfallen, auszufallen drohen oder wenn extreme Wetter-, Sicht- oder Strassenverhältnisse beobachtet werden, die das System überfordern könnten.

Auf den ersten Blick scheint eine naheliegende Lösung, in derartigen Situationen die lenkende Person zu alarmieren und ihr die Kontrolle für ein schnelles Eingreifen zur Bereinigung der Lage zu übertragen. Dies funktioniert jedoch aus zwei Gründen nicht. Erstens benötigt ein Mensch, der gerade auf etwas anderes konzentriert war, mehrere Sekunden zur hinreichenden Erfassung der Verkehrssituation und zur Intervention. Dann kann es bereits zu spät sein bzw. im laufenden Verkehr wäre es vermutlich mit ziemlicher Sicherheit zu spät, den Schaden noch zu verhindern. Zweitens besagt das Automatisierungs-Paradox (Bainbridge 1983), dass Menschen in einem hochautomatisierten Umfeld Überwachungsaufgaben generell und insbesondere die Entschärfung von Notsituationen

kaum angemessen durchführen können. Denn ihnen fehlt der Routinebetrieb, wenn dieser durch autonome Technik bewältigt wird. Routine ist jedoch nötig, um Nicht-Standardsituationen schnell, sicher und adäquat zu erfassen und geeignete Massnahmen einzuleiten. Die Ethik-Kommission (2017, Regel 17) zieht daraus den Schluss:

Software und Technik hochautomatisierter Fahrzeuge müssen so ausgelegt werden, dass die Notwendigkeit einer abrupten Übergabe der Kontrolle an den Fahrer («Notstand») praktisch ausgeschlossen ist.

Diese Anforderung zieht also aus der Erkenntnis, dass vorab am Verkehrsgeschehen unbeteiligte Menschen mit der Behebung plötzlich auftretender Notlagen überfordert wären, den Schluss, dass das Eintreten solcher Notlagen technisch vermieden werden muss. Die impliziert erhebliche Redundanz- und Früherkennungsanforderungen an die technischen Systeme.

(2) Anpassungsnotwendigkeiten

Im Mischbetrieb autonomer und menschengeführter Fahrzeuge – dieser Mischbetrieb wird zumindest für lange Zeit die Regel sein – entstehen Kommunikationsnotwendigkeiten zwischen autonom betriebenen Fahrzeugen und menschlichen Verkehrsteilnehmenden. Es müssen sich also Menschen und technische, von Sensoren mit Daten gefütterte Systemen gegenseitig «verstehen». Die Botschaft, die eine Seite sendet, verbal oder nonverbal, bei Menschen etwa durch Winken, muss von der anderen Seite, also vom Computer, gemäss der Intention des Senders interpretiert werden, da Missverständnisse Sicherheitsprobleme erzeugen und Unfälle verursachen können. Es stellt sich also die Frage, wer sich wem anpassen muss: die menschliche Seite der technischen oder umgekehrt, oder ob beide auf einen gemeinsamen Code irgendwo in der Mitte verpflichtet werden. Die Ethik-Kommission (2017, S. 13) empfiehlt dazu:

Um eine effiziente, zuverlässige und sichere Kommunikation zwischen Mensch und Maschine zu ermöglichen und Überforderung zu vermeiden, müssen sich die Systeme stärker dem Kommunikationsverhalten des Menschen anpassen und nicht umgekehrt erhöhte Anpassungsleistungen dem Menschen abverlangt werden.

Damit soll vermieden werden, dass menschliches Handeln vermittelt über fortschreitende Digitalisierung, nach den Anforderungen technischer Systeme reguliert und immer stärker durchnormiert

wird. Die Frage nach einer vernünftigen Balance zwischen sozial akzeptabler, oft durch technische Notwendigkeit motivierte Anpassung von Menschen an die Technik einerseits und dem legitimen Beharren auf einer menschlichen und daher gerade nicht technisch durchnormierten Kommunikation und Lebenswelt ist zwar keine im engeren Sinne ethische Fragestellung, weist aber durch ihren Einfluss auf die Gestaltung der menschlichen Lebenswelt durchaus ethische Facetten auf.

(3) Ethik-Dilemmata

Häufig werden gerade in der Öffentlichkeit, aber auch in der philosophischen Ethik Extremsituationen diskutiert, in denen es keine moralisch wünschenswerte Lösung gibt, sondern nur die Suche nach dem kleinsten Übel verbleibt. Als Beispiele werden häufig Situationen genannt, in denen ein selbstfahrendes Auto etwa nur die Wahl hätte, in zwei Kinder oder drei ältere Leute hineinzufahren bzw. entweder die eigenen Insassen oder unbeteiligte Fussgänger:innen zu gefährden. In der Sorge, dass in derartigen Dilemma-Situationen der Wert von Menschenleben durch einen Algorithmus ausgerechnet und dann mittels eines Nutzenmaximierungskalküls die Entscheidung herbeigeführt würde, kommt es häufig zu Empörung bis zur Zurückweisung der Technologie, auch wenn die Technik in keiner Weise in der Lage ist, Alter oder gar sozialen Status von Fussgänger:innen oder Insassen eines entgegenkommenden Fahrzeugs zu erkennen. Auf Basis der Moralphilosophie von Immanuel Kant und nach dem deutschen Grundgesetz hat die Ethik-Kommission (2017, Regel 9) eindeutig formuliert:

Bei unausweichlichen Unfallsituationen ist jede Qualifizierung nach persönlichen Merkmalen (Alter, Geschlecht, körperliche oder geistige Konstitution) strikt untersagt. Eine Aufrechnung von Opfern ist untersagt.

Dennoch muss der Bordcomputer die Aktion festlegen, die im Falle des Auftretens einer Dilemma-Situation eingeleitet werden soll, und zwar zweifelsfrei und rechtssicher. Diese hängt von ethischen Regeln ab, die in den Algorithmen festgeschrieben werden. Diese Regeln müssen daher transparent, ethisch reflektiert, öffentlich diskutiert und rechtlich abgesichert sein, um Vertrauen zu ermöglichen, dass in Dilemma-Situationen, insbesondere wenn es um Leben und Tod geht, sorg-

fältige Überlegungen und legitimierte Entscheidungen hinter der Ausgestaltung der technischen Systeme stehen. Angesichts der erkennbaren Schwierigkeiten, wenn nicht der Unmöglichkeit, diese Regeln für eine nicht antizipierbare Vielfalt von Situationen auslegen zu müssen, sieht die Ethik-Kommission (2017, Regel 5) hier wiederum die Technik in der Pflicht:

Die Technik muss nach ihrem jeweiligen Stand so ausgelegt sein, dass kritische Situationen gar nicht erst entstehen, dazu gehören auch Dilemma-Situationen, also eine Lage, in der ein automatisiertes Fahrzeug vor der «Entscheidung» steht, eines von zwei nicht abwägungsfähigen Übeln notwendig verwirklichen zu müssen.

(4) Privatheit und Überwachung

Vernetzt fahrende Fahrzeuge werden mit einer Leitzentrale über das Internet verbunden sein und können durch die elektronischen Spuren vollständige Bewegungsprofile erzeugen. Derartige Profile sind bekanntlich eine wertvolle Information einerseits für Sicherheitskräfte und Geheimdienste und andererseits für Unternehmen, die damit ihre zielgenaue Werbung optimieren können. In beiden Fällen stellen sich natürlich die bekannten ethischen Fragen nach Privatheit und Datenschutz. Diese weitreichenden Möglichkeiten der Überwachung durch Datenauswertung und Nachverfolgung bis hin zu Missbrauch sind allerdings nicht für das autonome Fahren spezifisch. In dieser Hinsicht ist das autonome Fahren nur ein weiteres Feld, in dem berechtigte Überwachung und Schutz der Privatheit abgewogen werden müssen (Ethik-Kommission 2017):

Eine vollständige Vernetzung und zentrale Steuerung sämtlicher Fahrzeuge im Kontext einer digitalen Verkehrsinfrastruktur ist ethisch bedenklich, wenn und soweit sie Risiken einer totalen Überwachung der Verkehrsteilnehmer und der Manipulation der Fahrzeugsteuerung nicht sicher auszuschließen vermag.

Mit der rasch fortschreitenden Datafizierung immer weiterer Gesellschaftsbereiche verschärfen sich die Anforderungen an die technische Gestaltung der Systeme, um ethische Forderungen und grundrechtliche Vorgaben zu sichern (Kolany-Raiser et al. 2018). Dies gilt auch für das autonome Fahren.

(5) Letztkontrolle

Je autonomer Technik wird, umso deutlicher stellen sich Fragen, welche Seite die Kommunikation und Kooperation kontrolliert und im Zweifel das letzte Wort hat (Kehl/Coenen 2016). Spontan kommt es häufig zu dem Reflex, dass die Letztkontrolle grundsätzlich beim Menschen liegen müsse. So plausibel diese Forderung zunächst klingen mag, führt sie bei näherer Betrachtung rasch zu Zweifeln. Denn nicht immer handelt der Mensch so ethisch verantwortlich, wie das wünschenswert wäre. Empirisch kommt es nicht nur zu menschlichen Schwächen, sondern auch zu kriminellen Verhalten (Grunwald 2019b). In beiden Fällen könnte es ethisch geboten sein, dem jeweiligen Menschen die Kontrolle zu entziehen, um andere Menschen zu schützen. Ein Beispiel ist, wenn der Bordcomputer in einem autonomen Fahrzeug bemerkt, dass die lenkende Person nicht fahrtüchtig, also z. B. übermüdet, aggressiv oder alkoholisiert ist, und aus Gründen des Schutzes anderer und seiner selbst vom weiteren Selbstfahren abgehalten werden sollte. Wie entsprechende Systeme gestaltet werden, ob und wann der Mensch das letzte Wort haben darf oder soll, ist ein Grundsatzthema für die Gestaltung zukünftiger Mensch-Maschine-Verhältnisse (Kehl/Coenen 2016). Es ist dabei zu beachten, dass im Falle des genannten möglicherweise nicht fahrtüchtigen Autofahrers die Entscheidung, ob ein Mensch als fahrtüchtig anerkannt wird oder nicht, dem technischen System übertragen würde. Menschliche Autonomie würde abhängig gemacht von der «Genehmigung» durch die Technik. Die Technik würde hierbei von Menschen – Programmierer:innen, Psycholog:innen, Ethiker:innen, Jurist:innen etc. – mit menschlich gesetzten Kriterien entsprechend programmiert und Algorithmen würden als «Aufseher» über Menschen eingesetzt. Selbst wenn dieser Situationstypus durchaus aus anderen Kontexten, etwa bei Sicherheitskontrollen, vertraut ist, entsteht eine ethisch zu reflektierende Situation.

(6) Zwischen Freiheit und Sicherheit

Über unmittelbare Anpassungsnotwendigkeiten im Alltagsbetrieb autonomen Fahrens hinaus steht das Verhältnis von Freiheit und Sicherheit im Mobilitätsbereich, aber auch in anderen gesellschaftlichen Feldern, im Interesse von Öffentlichkeit und Ethik. Wenn technisch garantierte und auch

durchgesetzte Sicherheit als gesellschaftliches Ziel absolut gesetzt würde, könnte mit Sicherheitsargumenten der Weg in eine technisch geprägte Welt auf Kosten menschlicher Freiheit beschritten werden. Das Ergebnis wäre eine zwar hoffentlich sichere, aber technisch völlig durchregulierte Mobilität und in einem weitergehenden Sinne dann möglicherweise eine entsprechend technisch durchorganisierte Gesellschaft. Demgegenüber hält die Ethik-Kommission (2017, Regel 4 und die Erläuterungen S. 21f.) fest:

Ausdruck der Autonomie des Menschen ist es, auch objektiv unvernünftige Entscheidungen wie eine aggressivere Fahrhaltung oder ein Überschreiten der Richtgeschwindigkeit zu treffen. Dabei würde es dem Leitbild des mündigen Bürgers widersprechen, würde der Staat weite Teile des Lebens zum vermeintlichen Wohle des Bürgers unentrinnbar durchnormieren und abweichendes Verhalten sozialtechnisch bereits im Ansatz unterbinden wollen. ... Es besteht keine ethische Regel, die Sicherheit immer vor Freiheit setzt.

Freiheit impliziert danach die Möglichkeit objektiv unvernünftiger Entscheidungen oder anders gesagt: Die vollständige Durchsetzung objektiv vernünftiger Entscheidungen wäre das Ende der Freiheit. Im letzten Satz ist das Wort «immer» wichtig. Es weist darauf hin, dass grundsätzlich Abwägungen statt einer Pauschalargumentation erforderlich sind. Um die Balance zwischen freiheitseingrenzender Sicherheit und sicherheitsbegrenzender Freiheit in der weiteren Adaptation autonomer Systeme im Mobilitätsbereich, aber auch darüber hinaus, immer wieder neu wissenschaftlich fundiert und ethisch reflektiert auszutariieren, sind letztlich öffentliche Debatten und demokratische Entscheidungen gefragt.

2.2 Sozialethische Fragen

In der Debatte um autonomes Fahren werden ethische Fragen auf anderen Ebenen und für andere Akteure häufig ausgeblendet. Da damit grosse Märkte, Wertschöpfungsketten, Geschäftsmodelle und Gewinnerwartungen verbunden werden, gibt es einen globalen Wettbewerb um Konzepte und schnelle Markteinführung. Dadurch können neue Systemeffekte im Mobilitätssystem und Folgen für den Arbeitsmarkt entstehen sowie neue gesellschaftliche Abhängigkeiten einkehren, sowohl von technischen Systemen als auch von den Akteuren hinter diesen Systemen. Diese möglichen Entwicklungen bergen Chancen und Risiken, die ebenfalls vorausschauend analysiert und unter ethischer Perspektive bedacht werden müssen (in Anlehnung an Brändle/Grunwald 2020).

(1) Ökonomische Risiken

Erforschung und Entwicklung von Technologien des autonomen Fahrens sind aufwändig und kostenintensiv, sowohl auf der Ebene der individuellen Fahrzeuge und ihrer Interaktion als auch in Bezug auf die Strasseninfrastruktur. Für die involvierten Unternehmen besteht das betriebliche Risiko, dass der Return on Investment nicht in der erwarteten Grössenordnung oder nicht im erwarteten Zeitraum kommt, etwa weil autonomes Fahren sich nicht in grösserem Umfang durchsetzt. Auf der anderen Seite besteht bei einem Verzicht auf diese Investitionen das Risiko, dass Konkurrenten im Erfolgsfall das Geschäft machen. Hier müssen also strategische Unternehmensentscheidungen unter Abwägung der unterschiedlichen Risiken getroffen werden. Dies ist eine klassische Aufgabe des Managements aufgrund der Grössenordnung der Investitionen von unternehmensethischer Relevanz.

(2) Arbeitsmarkt

Eine umfassende Realisierung des autonomen Fahrens hätte zweifellos Auswirkungen auf den Arbeitsmarkt. Betroffen wären primär, abhängig von den Bereichen der Autonomisierung des Verkehrs, Lastwagenfahrer:innen, Taxifahrer:innen und Mitarbeitende von Logistik- und Zustellunternehmen, die in einer auf autonomes Fahren umgestellten Mobilitätswelt weitgehend nicht mehr benötigt würden. Auf der anderen Seite entstehen neue Berufsfelder in der Steuerung und Überwachung des autonomen Verkehrs, auch in der Entwicklung und Umsetzung darauf aufbauender neuer Mobilitätsdienstleistungen. Aus Perspektive der Verteilungsgerechtigkeit müssen diese Gewinner:innen-Verlierer:innen-Konstellationen analysiert und ethisch wie politisch reflektiert werden. Eine gesellschaftliche Entwicklung hin zu autonomem Fahren muss diese den potenziellen Verlierer:innen gegenüber legitimieren und gegebenenfalls, wenn die Verluste nicht zumutbar sind, auch Kompensation leisten, sowohl in Bezug auf die ökonomische Existenz der Betroffenen als auch in der Frage nach einem sinnstiftenden Platz für diese Gruppen in einer zukünftigen Gesellschaft. Im Sinne eines ethischen Vorsorgegebots sollten in Kooperationen aus Gewerkschaften und Arbeitgebern, Wissenschaft und Politik frühzeitig Transformationsstrategien für die betroffenen Berufe entwickelt werden, z. B. im Hinblick auf die Vorbereitung von Betroffenen auf neue Berufe durch Weiterbildung.

(3) Abhängigkeit

Moderne Gesellschaften sind vom reibungslosen Funktionieren von Technik zunehmend abhängig. Dies beginnt mit der Abhängigkeit vom individuellen Computer und Auto und reicht bis hin zur vollständigen Abhängigkeit von einer funktionierenden Energieversorgung und dem Funktionieren der weltweiten Datenkommunikation. Bei einer weitgehenden Umstellung der Mobilität auf autonomes Fahren würde ein grosser Teil der gesellschaftlichen Mobilitätsbedürfnisse vom Funktionieren dieses Systems abhängen. Das dauerhafte reibungslose Funktionieren ist jedoch nicht garantiert. Mit der weiteren Digitalisierung und der Übergabe von Autonomie an technische Systeme wächst die gesellschaftliche Anfälligkeit gegenüber systemischen Störungen wie auch externen Angriffen (Hacking). Falls z. B. weite Teile der Logistik und des Güterverkehrs autonom abgewickelt würden, wäre schwer vorstellbar, für den Fall eines länger andauernden Komplettausfalls ein umfangreiches Fahrpersonal vorzuhalten, selbst wenn die Fahrzeuge noch manuell betrieben werden könnten. Im Ausfall wesentlicher Logistikketten käme es schnell zu möglicherweise katastrophalen Engpässen in der Versorgung der Bevölkerung. Die zunehmende Abhängigkeit von technischen Systemen mit entsprechenden Risiken im Fall von Ausfällen stellt sich üblicherweise mehr oder weniger schleichend ein und wird vielfach nicht explizit in Risiko-Chance-Abwägungen berücksichtigt, häufig gar nicht wahrgenommen oder sogar verdrängt. In ethischer Perspektive erscheint es jedoch aus Vorsorgenotwendigkeiten geboten, den jeweiligen Stand der Abhängigkeit zu erheben, Bewusstsein dafür zu schaffen, mögliche Schadensszenarien im Fall des Falls zu explorieren und Massnahmen für diese Schadensfälle vorbereitend zu entwickeln.

3. Diskrepanz ethische Relevanz und öffentliche Debatte

Die geschilderten ethischen Herausforderungen autonomen Fahrens unterscheiden sich nicht nur nach involvierten ethischen Fragen, sondern auch nach Massgabe des öffentlichen Interesses und der Relevanz für das Verkehrsgeschehen. Verständlicherweise reagieren Medien und Öffent-

lichkeit besonders stark auf Fragen von Leben und Tod. Dilemma-Situationen werden häufig in den Kontext der Frage gestellt, ob Maschinen über Leben und Tod entscheiden dürfen, was in der Regel zu einem ablehnenden Reflex bis hin zur Empörung führt. Diese Skandalisierung jedoch geht, wie dies im Folgenden kurz erläutert wird, am Kern der ethischen Herausforderungen vorbei.

Der erste Punkt geht von der Frage aus, ob Algorithmen und Maschinen überhaupt etwas «entscheiden», wie dies der gängige Sprachgebrauch suggeriert. Von einem Bordcomputer, der ein Auto steuert, wird erwartet, dass er sich an die Strassenverkehrsordnung hält und Gefahrensituationen erfolgreich meistert. In einer bestimmten Situation, erfasst in der passenden Datenlage, kommt der Bordcomputer nach Durchlauf seiner Algorithmen zu einem durch Algorithmen und Daten determinierten Ergebnis. Dies ist allerdings keine Entscheidung, da Entscheiden begrifflich gerade keine determinierte Festlegung, sondern an die abwägende und begründende Auswahl zwischen Optionen gebunden ist, die im Bordcomputer nicht erfolgt. In diesem technischen System hat der Bordcomputer keine Wahl, sondern muss das umsetzen, was in den Kalkulationen auf Basis der jeweiligen Daten herauskommt. Er entscheidet nichts, sondern rechnet etwas aus (Brändle/Grünwald 2019), und zwar nach von Menschen vorgegebenen Kriterien. Die Entscheidung über Leben und Tod bleibt damit beim Menschen. Sie wandert allerdings von den einzelnen Lenkenden zu Personen und Institutionen im Hintergrund, zu Firmen, Programmierer:innen, Manager:innen und Regulierungsbehörden. Es trägt also nicht der Bordcomputer Verantwortung über Leben und Tod, sondern es sind diejenigen Menschen Träger der Verantwortung, die für dessen Funktionsweise und den Betrieb des Fahrzeugs zuständig sind (dazu Teil 4). Die massenmediale Skandalisierung, dass bei autonomen Fahrzeugen ein Computer über Leben und Tod entscheidet, führt daher in die Irre.

Eine weitere Problematisierung öffentlicher Wahrnehmung bezieht sich auf die oben erwähnten Dilemma-Situationen. Ein Kind läuft plötzlich auf die Strasse und gleichzeitig gibt es Gegenverkehr, diese dramatische Beschreibung ist ein Albtraum für jede lenkende Person: Unabhängig davon, wie gehandelt wird, wird Schaden bis hin zum Tod für das auf die Strasse laufende Kind verursacht. Ver-

schärfend kommt hinzu, dass die Entscheidung, auszuweichen oder nicht, und wenn, dann nach rechts oder links, in Sekundenbruchteilen getroffen werden muss. Obwohl es um Leben oder Tod geht, bleibt zum Überlegen keine Zeit. Auch hier ist psychologisch zunächst die Alarmstimmung verständlich, sie verfliegt jedoch bei näherem Hinsehen. Entscheidend ist, dass Dilemma-Situationen des geschilderten Typs extrem selten sind, so selten, dass dazu keine statistischen Zahlen existieren. Selbst wenn sie in den vielen Vorgängen im Strassenverkehr nicht auszuschliessen sind, wenn sie gelegentlich einmal vorkommen mögen und wenn einige der etwa 3000 Verkehrstoten in Deutschland auf eine solche Weise ums Leben gekommen sein sollten, stellen Dilemma-Situationen in der Gesamtsituation kein ernsthaftes Problem dar. Zur Veranschaulichung: Wenn von 3000 Verkehrstoten etwa 10 den Dilemma-Situationen geschuldet sind – eine Zahl, die wahrscheinlich deutlich zu hoch gegriffen ist –, entstehen die anderen 2990 Verkehrstoten im so genannten Normalbetrieb des Strassenverkehrs. Nicht die Dilemma-Situationen sind das ethische Problem im Verkehr, sondern der Normalbetrieb ist es. Die geringe bis praktisch nicht vorhandene Relevanz der Dilemma-Probleme ist auch daraus zu ersehen, dass Fahrschüler:innen auf diese nicht vorbereitet werden. Die vielen Millionen Führerscheinbesitzer:innen in Deutschland sind nie auf gutes Verhalten in Dilemma-Situationen trainiert worden. Diese werden im Unterricht nicht einmal erwähnt und in Führerscheinprüfungen nicht abgefragt. Also handelt es sich um ein zwar theoretisch interessantes, aber künstliches Problem, geeignet für öffentliche Empörung und Doktorarbeiten der Ethik, aber ohne Bedeutung im realen Strassenverkehr.

4. Zur Verteilung von Verantwortung

In Kooperationsformen von Mensch und zusehends autonomen technischen Systemen werden Zuständigkeiten und damit auch Verantwortlichkeiten neu verteilt. Die Rede von der autonomen Technik macht dies besonders deutlich, war doch das Prädikat der Autonomie im Sinne der Anthropologie Immanuel Kants bis dato Menschen vorbehalten. Die öffentliche wie auch die ethische Debatte zum autonomen Fahren thematisiert immer wieder, welche Zuständigkeit technischen Sys-

temen übertragen werden darf. Industrielle Produktion in der Industrie 4.0 (Manzlei et al. 2016), der militärische Einsatz von Drohnen (Grünwald/Kehl 2020) und computer- oder robotergestütztes ärztliches Handeln sind Beispiele jenseits des autonomen Fahrens. In neu entstehenden Konstellationen von Mensch und Technik müssen Zuständigkeiten und Verantwortlichkeiten bis hin zu Haftungsfragen ethisch reflektiert und rechtssicher geregelt werden.

Verantwortung wandert im Fall autonomer Fahrzeuge von den selbstfahrenden menschlichen Autofahrer:innen zu Personen und Institutionen im Hintergrund, zu Firmen, Programmierer:innen, Manager:innen, Regulierungsbehörden oder Ethikräten bzw. zu einer Mixtur aus diesen und vermutlich weiteren Beteiligten (Ethik-Kommission 2017, S. 11):

Die dem Menschen vorbehaltene Verantwortung verschiebt sich bei automatisierten und vernetzten Fahrsystemen vom Autofahrer auf die Hersteller und Betreiber der technischen Systeme und die infrastrukturellen, politischen und rechtlichen Entscheidungsinstanzen.

Die Regelung dieser komplexen Verantwortungslage erscheint im Prinzip machbar, vor allem angesichts vorliegender Erfahrungen mit Verantwortungszuschreibung in komplexen und arbeitsteiligen Zusammenhängen, etwa in grossen Behörden oder Unternehmen. Freilich wächst mit der Komplexität der zwischen Mensch und zunehmend autonomer Technik verteilten Zuständigkeiten das Risiko einer "Verantwortungsdiffusion" ins Nichts. Hier besteht Sorgfaltspflicht, die komplexen Zuschreibungen explizit zu machen, um ein Verschwinden der Verantwortung in einen opak-grauen und undurchsichtigen Bereich zu vermeiden, genauso um intentionaler Verantwortungsverschleierung (Beck 1988) keinen Vorschub zu leisten, sondern Klarheit zu schaffen. Es muss transparent sein, wo die Verantwortung für was liegt, welchen Institutionen Vertrauen warum und wozu entgegengebracht wird und worauf sich dieses gründet.

Die Gewährleistung einer adäquaten Verteilung der Verantwortung ist eine Herausforderung für die Gestaltung und Markteinführung autonomen Fahrens. Hier kann auf die Erfahrungen der Technikfolgenabschätzung (Grünwald 2022), des Ansatzes Responsible Research and Innovation (Owen et al. 2013) und des Value Sensitive Design zurückgegriffen werden.

Literatur

Beck, U. (1988): Die organisierte Unverantwortlichkeit. Frankfurt.

Becker, U. (2021): Mobilität und Verkehr. In: A. Grunwald, R. Hillerbrand (Hg.): Handbuch Technikethik. Metzler, Stuttgart (im Erscheinen).

Brändle, C.; Grunwald, A. (2019): Autonomes Fahren aus Sicht der Maschinenethik, in: O. Bendel (Hrsg.), Handbuch Maschinenethik, Wiesbaden, 281–300.

Ethik-Kommission autonomes und vernetztes Fahren (2017): Endbericht. Berlin (abrufbar unter: https://www.bmvi.de/Shared-Docs/DE/Publikationen/DG/bericht-der-ethik-kommission.pdf?__blob=publicationFile, 20.2.2021).

Grunwald, R., Kehl, C. (2020): Autonome Waffensysteme. Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag, Berlin. Download: <https://www.tab-beim-bundestag.de/de/pdf/publikationen/berichte/TAB-Arbeitsbericht-ab187.pdf> (18.6.2021)

Grunwald, A. (2022): Technikfolgenabschätzung – eine Einführung. 3. Aufl. Baden-Baden (erscheint im Juni 2022).

Grunwald, A. (2015): Gesellschaftliche Risikokonstellation für Autonomes Fahren. Analyse, Einordnung und Bewertung, in: Maurer/Gerdes/Lenz/Winner (Hrsg.), Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte. Berlin et al. 2015, 661–685.

Grunwald, A. (2019a): Autonomes Fahren: Technikfolgen, Ethik und Risiken. Strassenverkehrsrecht 3, 81–86.

Grunwald, A. (2019b): Der unterlegene Mensch. Die Zukunft der Menschheit im Angesicht von Algorithmen, Robotern und Künstlicher Intelligenz, München.

Kehl, C., Coenen, C. (2016): Technologien und Visionen der Mensch-Maschine-Entgrenzung. Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag. Berlin.

Manzlei/Schleupner/Heinz (Hrsg.), Industrie 4.0 im internationalen Kontext, Berlin 2016.

Maurer, M.; Gerdes, J.C.; Lenz, B.; Winner, H. (eds.) (2015): Autonomes Fahren: Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte. Berlin.

Owen, R., Bessant, O., Heintz M. (Hrsg.) (2013): Responsible Innovation: Managing the Responsible Emergence of Science and Innovation in Society. London.

van den Hoven, J.; Vermaas, P.E.; van de Poel, I. (eds.) (2015): Handbook of Ethics, Values, and Technological Design: Sources, Theory, Values and Application Domains. Dordrecht.

Vision zukünftiger, digitalisierter und vernetzter Mobilitätskonzepte I

Meike Jipp¹
Karsten Lemmer¹

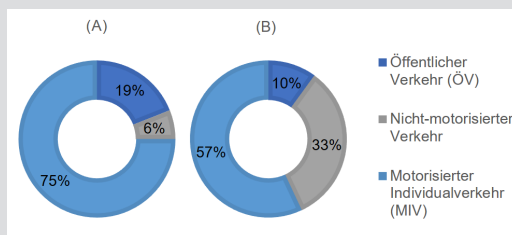
1. Motivation

Stellen Sie sich vor, Sie leben in der Gemeinde Tamins, die sich 10 Kilometer westlich der Stadt Chur befindet. Es ist der 12. Januar 1900, und Sie müssen um 10.00 Uhr bei einem wichtigen Arzttermin in Chur sein. Ein guter Freund von Ihnen ist Pferdefuhrwerkunternehmer und bietet Ihnen an, Sie mit einer seiner Kutschen in die Stadt zu bringen. Sie nehmen das Angebot gerne an, und er holt Sie gegen 8.30 Uhr ab. Während der Fahrt, die ca. eine Stunde dauert, unterhalten Sie

sich angeregt. Das Gesprächsthema liegt auf der Hand: Seit wenigen Monaten bevölkern hin und wieder Automobile die Strassen. Ihr Freund macht sich diesbezüglich grosse Sorgen. Die Fahrzeuge gefährden die Sicherheit anderer Verkehrsteilnehmer und ruinieren die teuren und schmalen Strassen des Kantons. Die Fahrzeuge wirbeln zudem viel Staub auf, der die Ernte der Bauern der Region ruinieren könnte. Dies wäre eine Katastrophe: Wie sollten dann die Menschen, die in der kalten Jahreszeit in ihren Bergdörfern eingeschlossen sind, den Winter überleben? Diese Diskussionen sind kein Einzelfall (s. Schiedt & Stirnimann, 2015; Simonett, 1993): Am 17. August 1900 wird die Nutzung der Automobile in Graubünden verboten. Das Verbot ist ein Vierteljahrhundert gültig.

Der Blick in die Historie und die sogenannte «verweigerte Automobilität» (s. Simonett, 1993) in Graubünden zeigt, wie deutlich sich Zeiten ändern können: Heute wäre es für einen Grossteil der Bevölkerung eine Selbstverständlichkeit, mit dem eigenen Automobil in die Stadt zu fahren. Viele wären überzeugt, damit sicher und pünktlich zum Arzt zu kommen. Diese Annahme lässt sich damit begründen, dass im Jahr 2015 mindestens ein PKW in 78 Prozent der Schweizer Haushalte zur Verfügung stand; in fast jedem dritten Haushalt gab es mehr als ein Fahrzeug (s. Perret et al., 2017). Diese Mehrfachmotorisierung zeigt sich auch in Deutschland. Dort hatte jeder Haushalt durchschnittlich 1,1 PKW parat. Mit diesen PKW wurden 75 Prozent aller Kilometer und 57 Prozent aller Wege zurückgelegt (s. BMVI, 2017 und Abbildung 1). Der PKW entwickelte sich also zum essentiellen Hilfs- und Transportmittel der Menschen.

Abbildung 1: Prozent der Kilometer (a) und Wege (b) der genutzten Verkehrsmittel im Jahr 2017 (s. BMVI, 2017)



¹ Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Die Mobilität der Menschen ist kein Selbstzweck. Sie ermöglicht Menschen das Stillen der Bedürfnisse nach Nahrung, sozialen Kontakten, Wissen, Verstehen und Selbstverwirklichung. Menschen fahren zum Supermarkt, um sich mit Lebensmitteln zu versorgen; sie fahren zur Vereinsstätte, um Hobbys nachzugehen und um sich mit Freundinnen und Freunden zu treffen; sie fahren zur Schule, um sich zu bilden; sie fahren zur Arbeit, um das Geld zu verdienen, mit dem sie sich Nahrungsmittel kaufen können. Mobilität ist daher ein wertvolles Gut, und Menschen entscheiden sich für das Verkehrsmittel, von dem sie überzeugt sind, dass es ihnen mit einer sehr hohen Wahrscheinlichkeit erlaubt, ihren Zielort möglichst zeitnah und kostengünstig zu erreichen. Diese Entscheidung fällt häufig für das Automobil aus; ansonsten würden weniger Menschen so viele Wege mit ihm zurücklegen (s. Jipp & Lemmer, 2021).

Der Fokus auf die Automobilität hat aus gesellschaftlicher Perspektive negative Konsequenzen: So ist zum Beispiel der Flächenverbrauch eines Fahrzeugs im Vergleich zum öffentlichen Personennahverkehr deutlich erhöht (BUND, k. D.): Ein stehender PKW, der durchschnittlich mit 1,4 Personen besetzt ist, verbraucht eine Fläche von 13,5 Quadratmetern pro Person. Im Gegensatz dazu benötigt ein stehender Omnibus, der zu 40 Prozent besetzt ist, eine Fläche von 1,2 Quadratmetern pro Person. In der Konsequenz werden also für PKW gigantische Flächen bereitgehalten, die stattdessen für die Implementierung von Grünflächen, Naherholungsgebieten oder Sozialräumen genutzt werden könnten. Die Automobilität reduziert also die Attraktivität unserer Städte. Eine andere Konsequenz sind Kohlendioxidemissionen (Statistisches Bundesamt, 2021): In der *Europäischen Union* wurden im Jahr 2018 ca. 888 Millionen Tonnen Kohlendioxid durch die Verbrennung von Kraftstoffen im Strassenverkehr ausgestossen. PKW und Motorräder verursachten 62 Prozent dieser Emissionen; auf Busse und LKW entfielen 26 Prozent. Dass diese Zahlen zu hoch sind und sich somit auch die Art und Weise, wie Menschen mobil sind, ändern muss, ist unumstritten.

Das Mobilitätsverhalten lässt sich auf verschiedenste Arten modifizieren. Es kann sich zum Beispiel verändern, wenn sich Wertestrukturen in der Bevölkerung ändern (Ruhrt, 2019). Insbesondere in der Mitte des letzten Jahrhunderts galt zum Beispiel der Besitz eines eigenen Fahrzeugs als wichtiges Statussymbol (Schreier & Biethahn, 2016). Dieser Stellenwert ist bei der Generation Y, die im Zeitraum der frühen 1980er-Jahre bis zu den späten 1990er-Jahren geboren wurde, deutlich geringer (s. Schreier & Biethahn, 2016). Dementsprechend sollten also die PKW-Besitz-Zahlen sinken, was sich aber in den Statistiken nicht abzeichnet. Das Gegenteil ist der Fall: Der PKW-Bestand steigt in Deutschland seit 2010 pro Jahr konstant um mehr als 500'000 PKW an (KBA, 2021). Die Anzahl der PKW, die ein Erwachsener pro Haushalt zur Verfügung hat, wächst seit 2002 ebenfalls deutlich (BMVI, 2017). Der Trend geht also eindeutig in Richtung einer Mehrfachmotorisierung der Individuen. Es ist darauf aufbauend sicherlich nicht überraschend, dass auch die Verkehrsleistung, die mit einem eigenen PKW zurückgelegt wurde, zwischen 2002 und 2017 um 24 Prozent anstieg (BMVI, 2017). Im Gegensatz dazu ist die Entwicklung zum Beispiel des öffentlichen Personennahverkehrs konstant. 30 Prozent der Bevölkerung nutzten weder im Jahr 2002 noch im Jahr 2017 den öffentlichen Personennahverkehr (BMVI, 2017). Veränderungen der Wertestrukturen der Bevölkerung manifestieren sich bisher also nicht in einem veränderten Verkehrsverhalten. Der Siegeszug der Automobilität ist trotz eines Wertewandels bisher ungebrochen.

Verkehrsverhalten lässt sich auch durch die Gesetzgebung verändern, wie auch schon das einführende Beispiel aus Graubünden zeigte. Im Juli 2021 präsentierte die *Europäische Union* eine Reihe von Rechtsinstrumenten, mit deren Hilfe sichergestellt werden soll, dass die Treibhausgasemissionen bis 2030 auf mindestens 55 Prozent der Emissionen von 1990 gesenkt werden. Zu den Hauptmassnahmen des Pakets «Fit for 55»

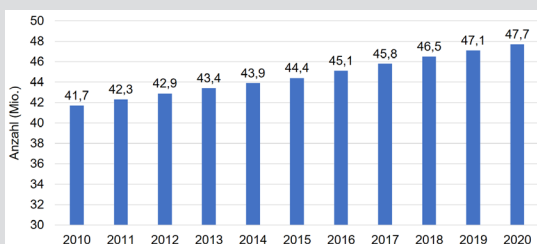


Abbildung 2:
Entwicklung des
PKW-Bestands in
Deutschland von
2010 bis 2020
(KBA, 2021)

gehören höhere Besteuerungen für fossile Kraftstoffe und somit höhere Preise, Abschaffung von Steuerbefreiungen und -ermässigungen für fossile Brennstoffe sowie eine Erhöhung der Anzahl verfügbarer Wasserstofftankstellen und Ladeinfrastrukturen für die Elektromobilität (im Bereich Fahrzeuge, leichte Nutzfahrzeuge und LKW) (Europäische Union, 2021). Dieses Massnahmenpaket ist nicht unumstritten (z. B. Willhuhn, 2021):

- Passt die Bevölkerung wirklich ihr Fahrverhalten an, wenn Fahrten mit dem eigenen PKW mit einem Verbrennungsmotor teurer werden? Die bisherige Fahrleistung von Elektrofahrzeugen liegt nämlich unter der durchschnittlichen Leistung aller Fahrzeuge (BMVI, 2017). Die hohen Fix- und geringen Betriebskosten führen nicht zu einer erhöhten Fahrleistung mit Elektrofahrzeugen. Der Grund ist, dass Elektrofahrzeuge nur genutzt werden, um kürzere Strecken zurückzulegen. Auf längeren Strecken kommt das Fahrzeug mit dem Verbrennungsmotor zum Einsatz (s. BMVI, 2017). Ändert sich dies, wenn die Kostenstrukturen geändert werden? Oder erleben wir dann in ganz Europa eine ähnliche Reaktion wie im Fall der französischen Gelbwesten?
- Wie reagiert die Industrie? Zieht sie ihre für die europäische Mobilität notwendigen Drehkreuze und Knotenpunkte aus Europa ab und verlegt sie in Länder, in denen die Preise tiefer sind (s. Ueberbach, 2021)?
- Ist es möglich, innerhalb kürzester Zeit die Infrastruktur für die Bereitstellung von alternativen Antrieben so aufzubauen, dass sie flächendeckend Fahrzeuge auf eine umweltschonende Weise mit alternativen Antrieben versorgen kann? Wie kann sichergestellt werden, dass batterieelektrische Fahrzeuge mit grünem Strom versorgt werden? Wie wird in den grossen Wohnblocks der Städte sichergestellt, dass ausreichend Stromtankstellen oder Schnellladeinfrastruktur zur Verfügung stehen? Und wie ist die Versorgung der Fahrzeuge mit Strom oder Wasserstoff sichergestellt, wenn häufiger werdende Naturkatastrophen die Infrastruktur zerstören?

Die aufgeworfenen Fragen zeigen die Notwendigkeit, einerseits die Mobilität aus einer systemübergreifenden Perspektive zu gestalten und andererseits der Bevölkerung und der Industrie attraktive Mobilitätschancen zu bieten. Was wäre denn gewesen, wenn am 17. August 1900 nicht die neue Technologie des Automobils, sondern das bewährte und vielfach genutzte Fortbewegungsmittel

der Pferdekutsche verboten worden wäre? Wären Sie bereit gewesen, einen Tag später den Weg zu Ihrem Arzttermin im 10 Kilometer entfernten Chur zu Fuss zurückzulegen und für den Heimweg gleich nochmals?

2. Zukünftige Mobilität: Einfach, attraktiv und klimafreundlich

Stellen Sie sich vor, Sie leben in der Gemeinde Tamins, die sich 10 Kilometer westlich der Stadt Chur befindet. Es ist der 12. Januar 2035, und Sie müssen um 10.00 Uhr bei einem wichtigen Arzttermin in Chur sein. Um 9.20 Uhr informiert Sie Ihre Datenbrille darüber, dass es Zeit wird, das Haus zu verlassen. Ihr Shuttle, ein automatisiert fahrendes Elektrofahrzeug, ist innerhalb kurzer Zeit bei Ihnen. Es hält direkt vor der Tür und lässt Sie bequem einsteigen. Kaum haben Sie Platz genommen, fährt es los. Das Fahrzeug erkennt richtigerweise, dass Sie etwas nervös sind. Der Arzttermin stresst Sie mehr, als Sie dachten. Das Fahrzeug reagiert jedoch gut. Es dimmt das Licht etwas und verändert kaum spürbar die Temperatur und Duftnote des Raums. Es hilft, Sie beruhigen sich innerhalb der kurzen Fahrt. Das Shuttle bringt Sie nur zum nächsten Mobilitätshub, der 2 Kilometer entfernt von Ihrem Wohnort liegt. Dort steigen Sie bequem und ohne Hektik aus. Ihr Blick schweift über das vielfältige und beeindruckende Serviceangebot am Hub. Sie erinnern sich, dass Sie am Abend auf dem Rückweg am Pop-up-Paket-Hub etwas für Ihren Partner oder Ihre Partnerin abholen sollen. Jetzt ist dafür aber keine Zeit. Ihre Datenbrille zeigt Ihnen nämlich schon an, dass Sie nun zum Bahnsteig gehen sollten, und navigiert Sie dorthin. Im Zug, der gerade einfährt, ist ein Platz für Sie reserviert. Wie gewünscht haben Sie eine Individualkabine mit Büroausstattung. Ihre Mobilitätsapp kennt zwar Ihre Präferenzen für die Gesellschaftskabine, sie weiss aber auch, dass Sie im Zug eine vertrauliche Videokonferenz mit Ihrer Kollegin abhalten müssen. Hierfür hat die Individualkabine einen grossen Vorteil: Sie sind vor neugierigen Ohren geschützt. Das Gespräch läuft gut, und Sie kommen gerade in Chur an, als das Telefonat zu Ende ist. Den letzten Kilometer zu Ihrem Zielort legen Sie gerne zu Fuss zurück. Der Weg verläuft durch den Urban Jungle, den Sie so sehr mögen. Dies ist eine Hochstrasse, die einem Park sehr ähnlich ist. Beton ist kaum zu sehen; Pflanzen dominieren. Die Anwohner:innen geniessen die Blicke aus ihren Fenstern. Attraktive Fusswege verlaufen im kühlen Schatten der Bäume. Der Urban Jungle gilt daher als grüne Lunge

der Stadt. Sie mögen diese grüne Lunge und freuen sich, als Ihre Datenbrille Ihnen den Weg dorthin zeigt. Aber Moment! Sie wollen sicherstellen, dass der Fussweg nicht durch Feinstaub und Emissionen belastet ist. Sie starten daher Ihre Mobilitätsapp, die aktuelle Daten zur Umweltbelastung sonifizieren und somit über Ihre Kopfhörer erlebbar machen kann. Heute gibt es keinen Grund zur Sorge: Es ist ein guter Tag für einen gesunden Spaziergang über den Urban Jungle! Die Belastungswerte sind niedrig. Sie laufen also durch die grüne Lunge und kommen erholt, entspannt und pünktlich um 10.00 Uhr bei der Arztpraxis an. Wären Sie lieber selbst Auto gefahren und dabei vielleicht noch im Stau gestanden?

Diese Vision zukünftiger Mobilität ist systemübergreifend und nutzt verschiedenste Bausteine:

- Autonome und umweltschonend angetriebene Fahrzeuge auf der Strasse, auf der Schiene und auf Wasserwegen ermöglichen eine flächendeckende Bereitstellung von geteilter Mobilität auf einem engmaschigen Verkehrsnetz. Das Netz des öffentlichen Personennahverkehrs ist nicht mehr durch vorab definierte Routen und Zeitpläne begrenzt. Fahrzeuge, die batterieelektrisch angetrieben sind, nutzen die flächendeckende Infrastruktur zum Laden je nach verfügbarer Zeit. Schwere Fahrzeuge nutzen grünen Wasserstoff.
- Vielfältige, modulare Fahrzeugkonzepte ermöglichen eine bedürfnisorientierte Zuordnung der Fahrzeuge zu einem Nutzer oder einer Nutzerin. Die Personen, die zum Beispiel Stauraum benötigen, bekommen den zusätzlichen Platz; die Personen, die einen Tisch zum Arbeiten benötigen, bekommen ihn.
- Digitalisierung erlaubt die nahtlose Vernetzung verschiedenster Verkehrsträger. Somit werden Ankunftszeiten garantiert und unnötige Wartezeiten verhindert. Wartezeiten nehmen Nutzerinnen und Nutzer als Behinderung der Zielerreichung wahr, sie reduzieren die Akzeptanz der Verkehrsmittel und sind somit unerwünscht.
- Eine Vernetzung intelligenter Systeme mit einer Mobilitätsapp erleichtert vieles. So können zum Beispiel Menschen von der (Indoor-)Navigation an einem unbekanntem Verkehrsknoten entlastet werden, indem die eigene Datenbrille den richtigen Weg anzeigt. Weiter können individuelle Bedürfnisse, Präferenzen, Einstellungen mit den entsprechenden Mobilitätsservices zusammenge-

bracht werden. Im Beispiel konnte das Smart Device die Vertraulichkeitsstufe des geplanten Termins. Dank einer verfügbaren Beschreibung von Serviceangeboten des Zugs konnte die Mobilitätsapp entgegen den Gewohnheiten das passende Abteil buchen. Essentiell ist die Vielfalt und Flexibilität der Angebote, sodass diese mit der Vielfalt und Flexibilität der Wünsche der Nutzerinnen und Nutzer in Übereinstimmung gebracht werden können.

- Innovative Methoden der Datengewinnung und -auswertung stellen relevante Informationen zum Beispiel über die Umweltbelastung der Wege leicht verständlich zur Verfügung. Weiter werden relevante Reaktionen der mobilen Personen erkannt und unter Berücksichtigung des Datenschutzes in ein angenehmes Nutzungserlebnis verwandelt. So könnten im Fahrzeuginnenraum des automatisierten Elektrofahrzeugs Kameras installiert sein, die anhand der Veränderung der Pupille die Herzratenvariabilität erkennen, welche wiederum einen validen Indikator für Stress darstellt. Der Zugriff auf die Klimaanlage ermöglicht dann eine zielführende Reaktion.
- Vielfältige Geschäftsmodelle an Knoten und in Fahrzeugen bieten Nutzenden an, während der Fahrt oder beim Umstieg Dinge zu erledigen, die im eigenen PKW nicht erledigt werden können und ggf. auch weitere Fahrten überflüssig machen. An Knoten können Pakete abgeholt werden; während der Fahrt können Videokonferenzen abgehalten oder die Nachhilfe für das Fach Mathematik für Kinder gebucht werden.
- Alternative Antriebstechnologien ermöglichen klimaneutrale Mobilität: Das Elektrofahrzeug wird mit grünem Strom aus erneuerbaren Energien wie Wasserkraft, Photovoltaik und Wind getankt.

Diese Liste ist die Basis für ein neues Mobilitätssystem, welches geteilt, hochverfügbar und vor allem attraktiver als das heutige Mobilitätssystem ist. Es bietet daher die Chance, die Fahrt mit dem eigenen PKW überflüssig zu machen. Das neue System bietet nämlich nicht nur das, was der eigene PKW bietet, sondern darüber hinaus weitere Services, die Menschen zu einer Verhaltensveränderung motivieren können.

3. Der Weg zur Realisierung der Vision: Change Management

Verkehrsverhalten ist eine extrem starke Routine von Menschen (z. B. Rammler, 2011). Menschen, die viele Jahre lang täglich mit dem eigenen PKW zur Arbeit gefahren sind, werden auch morgen mit einer sehr hohen Wahrscheinlichkeit mit dem eigenen PKW zur Arbeit fahren. Routinen haben einerseits den grossen Vorteil, dass sie uns entlasten (z. B. Ackerman, 2010): In unserem Alltag sind wir mit sehr vielen Informationen aus unserer Umgebung gleichzeitig konfrontiert. Diese Informationen müssen wir verarbeiten und miteinander in Beziehung setzen, um Handlungsmuster auszuarbeiten und umzusetzen. Dieser Prozess ist zeitaufwendig und anstrengend. Wenn wir immer wieder mit ähnlichen Informationen konfrontiert werden, bilden sich daher Muster zwischen der Wahrnehmung und der Handlung heraus, die als Routinen interpretiert werden können und die es uns erlauben, schneller und mit einer höheren Wahrscheinlichkeit korrekt zu handeln. Es ist daher nicht überraschend, dass wir Routinen ausbilden und sie immer wieder einsetzen, wenn sie sich bewährt haben.

Routinen haben andererseits den grossen Nachteil, dass es sehr schwer ist, sie zu ändern (z. B. Kuhnimhof et al., 2019). Wenn sich ein bestimmtes Verkehrsverhalten als Routine etabliert hat, werden die agierenden Personen zum Beispiel Informationen über neue Mobilitätsangebote kaum bewusst wahrnehmen; sie werden ihre Entscheidungen für die Fahrt mit dem eigenen PKW nicht hinterfragen und damit auch nicht ändern. Diese Prozesse gilt es mit einem geeigneten Change Management zu verändern.

Ein solches Change Management sollte auf vier Mechanismen basieren, die zeitlich sehr gut miteinander verwoben sein müssen:

- Unterbrechung der Routine des ungewünschten Verhaltens
- Information über ein alternatives, gewünschtes Verhalten
- Belohnung des gewünschten Verhaltens
- Sanktionierung des unerwünschten Verhaltens

Die Unterbrechung der Routine des ungewünschten Verhaltens bietet die Chance für eine Verhaltensänderung. Was wäre zum Beispiel, wenn das Nachbarskind auf Ihrem Parkplatz einen Feengarten aufbaut? Diesen Feengarten erwarten Sie nicht, d. h. er wird Ihre Aufmerksamkeit auf sich ziehen und Sie somit dazu bewegen, sich bewusst zu überlegen, ob Sie diesen Parkplatz jetzt benutzen und somit den Feengarten ruinieren möchten. Damit ist Ihre Routine unterbrochen, und es besteht die Chance, Ihr Verhalten zu ändern. Auch Apps können solche Routinen unterbrechen. So stehen Funktionen zur Verfügung, die erkennen, welches Verkehrsmittel Menschen benutzen (z. B. Liedtke, 2018). Diese Funktion kann auch verwendet werden, um ihr Verhalten zu unterbrechen und die agierende Person zumindest auf das eigene Verhalten aufmerksam zu machen.

Informationen über existierende, alternative Mobilitätsangebote müssen zur Verfügung stehen, und zwar genau zu dem Zeitpunkt, wenn das Routineverhalten der Menschen unterbrochen wird. Die Informationen können breit über Dialogmechanismen mit der Bevölkerung initiiert werden (z. B. Kolarova, Stark & Lenz, 2020); sie können zielgerichtet und situationspezifisch an das betroffene Individuum kommuniziert werden. Beide Mechanismen haben ihre Vorteile. Die Wahrscheinlichkeit, dass die Information zu einer Verhaltensveränderung führt, ist höher, wenn die Information personen- und situationspezifisch verteilt wird. Im Idealfall wird eine Handlungsempfehlung ausgesprochen, die konkret und einfach umgesetzt werden kann.

Das gewünschte Verkehrsverhalten muss belohnt werden (z. B. Kühnel & Bamberg, 1998). Diese Belohnung entsteht, wenn die Nutzerinnen und Nutzer von Service, Routenoptionen und zeitlicher Verfügbarkeit begeistert sind. Ebenfalls wirken Gamification-Ansätze, mit denen mobile Personen mit spielerischen Ansätzen wie dem Sammeln von Erfahrungspunkten oder Highscores (virtuelle) Güter oder Auszeichnungen gewinnen können (s. Kazhamiakin et al., 2015). So könnte zum Beispiel die bereits erwähnte App zum Erkennen des verwendeten Verkehrsmittels die Wege zählen, die umweltfreundlich zurückgelegt wurden. So wurden zum Beispiel in einer Gemeinde am Gardasee Urkunden für die Bewohnerinnen und Bewohner der Gemeinde ausgegeben, die am häufigsten das eigene Fahrzeug stehen liessen. Dieser Gamification-Ansatz motivierte sehr viele Bewohnerinnen und Bewohner, ihr Mobilitätsverhalten anzupassen. Positive Erlebnisse wie also das Erleben von Erfolg beim Zeigen des gewünschten Verhaltens oder auch das Erreichen einer Auszeichnung durch ein gewünschtes Verhalten erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass beim nächsten Mobilitätswunsch das Verhalten wieder gezeigt wird.

Die Sanktionierung ist neben der Belohnung ebenfalls notwendig, da Bestrafung als Lernmechanismus nachhaltiger wirkt als Belohnung (z. B. Kiesel & Koch, 2011). Ziel ist hier also, das ungewünschte Verhalten zu sanktionieren, zum Beispiel mit höheren Preisen oder Mechanismen, die das Verhalten unattraktiver werden lassen (z. B. Reduktion der Anzahl der Parkplätze). Wichtig ist hier, die subjektive Wirkung von Preisen insbesondere im Zusammenwirken mit der Belohnung zu berücksichtigen. So werden Verluste eines Geldbetrags stärker wahrgenommen als Gewinne des gleichen Geldbetrags (s. Kahneman & Tversky, 1979). Erleben Menschen, dass sie für ein Verhalten bestraft werden, zeigen sie dieses Verhalten in Zukunft mit einer geringeren Wahrscheinlichkeit (s. Kiesel & Koch, 2011).

Die vier Mechanismen der Unterbrechung, Information, Belohnung und Sanktionierung können Routinen sehr stabil verändern, wenn sie in der richtigen Reihenfolge implementiert werden: Die Information muss gesendet werden, wenn die Empfänger offen für die Information sind. Hierfür muss die Routine unterbrochen werden. Die Bestrafung des ungewünschten Verhaltens ist erst dann wirksam, wenn das gewünschte Verhalten bereits gezeigt und dieses auch belohnt wurde. Eine selektive Betrachtung dieser Mechanismen wird kaum zum Erfolg führen.

4. Zusammenfassung

Mobilität erlaubt Menschen die Befriedigung lebensnotwendiger Bedürfnisse. Es ist daher nicht überraschend, dass Menschen ihre Mobilitätsentscheidungen so treffen, dass die subjektive Wahrscheinlichkeit der Bedürfnisbefriedigung maximiert wird. Dieser Mechanismus hat zum Siegeszug der Automobilität beigetragen und Nachteile wie zum Beispiel eine hohe Flächennutzung sowie eine Schädigung des Klimas produziert. Ziel ist es nun also, das vorhandene Wissen über Verkehrsverhalten sowie neue Technologien wie Automatisierung, Digitalisierung und alternative Antriebe zu nutzen, um ein neues Mobilitätssystem zu implementieren. Dieses Mobilitätssystem ist in einem engmaschigen Netz hochverfügbar und erlaubt geteilte Mobilität, die einfach, attraktiv und klimafreundlich ist. Es bietet ausserdem einen Service, den das heutige Mobilitätssystem nicht leisten kann, und motiviert Menschen somit, auf das eigene Fahrzeug mit einem Verbrennungsmotor zu verzichten. Diese Vision kann nur dann Realität werden, wenn einerseits die entsprechenden Technologien und Antriebe implementiert und andererseits die mobilen Individuen im Change-Management-Prozess adäquat integriert werden. Technologien sind ein Hilfsmittel für Menschen; dass Menschen diese Hilfsmittel akzeptieren und den Mehrwert darin erkennen, ist Grundvoraussetzung für den Erfolg der Technologien.

Referenzen

- Ackerman, P. A. (2010). Skill acquisition. *The Corsini Encyclopedia of Psychology*, S. 1–2.
- BMVI (2017). *Mobilität in Deutschland (MiD): Ergebnisbericht*. Bonn: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI).
- BUND (k. D.). *Flächenverbrauch von Verkehrsmitteln*. Bremen: BUND. Online verfügbar unter <https://www.bund-bremen.net/mobilitaet/autoverkehr/strassenbau/flaechenverbrauch/>
- Europäische Union (2021). *Europäischer Grüner Deal: Kommission schlägt Neuausrichtung von Wirtschaft und Gesellschaft in der EU vor, um Klimaziele zu erreichen*. Brüssel: Europäische Union. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/IP_21_3541
- Jipp, M. & Lemmer, K. (2021). *Moderne Mobilitätsformen und die Bedürfnisse der Gesellschaft*. In: R. Haux, K. Gahl, M. Jipp, R. Kruse & O. Richter (Hrsg.), *Zusammenwirken von natürlicher und künstlicher Intelligenz* (S. 97–115). Wiesbaden: Springer.
- Kahneman, D. & Tversky, A. (1979). Prospect theory: An analysis of decision under risk. *Econometrica*, 47, S. 263–292.
- Kazhamiakin, R., Marconi, A., Perillo, M., Pistore, M., Valetto, G., Piras, L., ... & Perri, N. (2015). Using gamification to incentivize sustainable urban mobility. In 2015 IEEE First International Smart Cities Conference (ISC2) (S. 1–6). IEEE.
- KBA (2021). *Jahresbilanz – Bestand*. Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA).
- Kiesel, A. & Koch, I. (2011). *Lernen: Grundlagen der Lernpsychologie*. Wiesbaden: Springer.
- Kolarova, V., Stark, K. & Lenz, B. (2020). *Projekt DiVA – Gesellschaftlicher Dialog zum vernetzten und automatisierten Fahren*. Schlussbericht. Berlin: DLR.
- Kühnel, S. & Bamberg, S. (1998). Überzeugungssysteme in einem zweistufigen Modell rationaler Handlungen: Das Beispiel eines umweltgerechteren Verkehrsverhaltens. *Zeitschrift für Soziologie*, 27, S. 256–270.
- Kuhnimhof, T., Nobis, C. & Hillmann, K. (2019). *Veränderungen im Mobilitätsverhalten zur Förderung einer nachhaltigen Mobilität*. Berlin: Umweltbundesamt.
- Liedtke, G. (2018) *Neue Mobilitätsdaten am Beispiel des Moving-Lab des DLR – Wie können wir sie gewinnen und zukunftsorientiert nutzen*. Innovationskongress der FDP-Bundestagsfraktion, 15. Nov. 2018, Berlin.
- Perret, C., Murali, J.-L., Siegenthaler, C., Seewer, C. Kowald, M., Corpataux, A. & Danalet, A. (2017). *Verkehrverhalten der Bevölkerung, Ergebnisse des Mikrozensus Mobilität und Verkehr 2015*. Neuchâtel: Bundesamt für Statistik.
- Rammler, S. (2011). *Verkehr und Gesellschaft – Verkehrspolitik als Mobilitätsdesign*. In: Schwedes, O. (Hrsg.), *Verkehrspolitik. Eine interdisziplinäre Einführung* (S. 37–56). Wiesbaden: Springer.
- Ruhrort L. (2019). *Gesellschaftliche Voraussetzungen für einen Modal Shift: Theoretische Anhaltspunkte aus Soziologie und Transformationsforschung*. In: *Transformation im Verkehr. Studien zur Mobilitäts- und Verkehrsforschung*. Wiesbaden: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-658-28002-4_3
- Schiedt, H.-U. & Stirnimann, P. (2015). *Die Strassengeschichte des Kantons Graubünden vom 19. Jahrhundert bis in die Gegenwart*. Horgen, Schweiz: Tiefbauamt Graubünden.
- Schreier, J. H. & Biethahn, N. (2016). *Emotionaler Nutzen und Kosten des Autobesitzes: Eine Balancetheoretische Betrachtung des deutschen Fahrzeugmarktes*. Magdeburg: University of Bamberg Press.
- Simonett, J. (1993). Die verweigerte Automobilität: Das Bündner Autoverbot 1900–1925. *Zeitschrift für Politik, Wirtschaft und Kultur*, 71(4), 37–40. doi:10.5169/seals-341019
- Statistisches Bundesamt (2021). *Strassenverkehr: EU-weite CO₂-Emissionen seit 1990 um 24% gestiegen*. Berlin: Statistisches Bundesamt. Online verfügbar unter https://www.destatis.de/Europa/DE/Thema/Umwelt-Energie/CO2_Strassenverkehr.html
- Ueberbach, S. (2021). *EU-Klimapaket «Fit for 55»: Mondrakete oder Blendfeuerwerk?* Brüssel: ARD. Online verfügbar unter <https://www.tagesschau.de/kommentar/eu-klimapaket-101.html>
- Willhuhn, M. (2021). *«Fit for 55»-Paket: Das steht im Gesetespaket der EU-Kommission und das sagen die Verbände*. PV Magazin. Online verfügbar unter <https://www.pv-magazine.de/2021/07/15/fitfor-55-paket-das-steht-im-gesetespaket-der-eu-kommission-und-das-sagen-die-verbaende/>

Vision zukünftiger, digitalisierter und vernetzter Mobilitätskonzepte II

Thomas Küchler¹
Marius Schmidt²
Markus Erne³
Michael Sutter⁴

1. Stand der Mobilität

Die Welt wird vernetzter und das Bedürfnis nach individueller Mobilität immer ausgeprägter. Im Rahmen dieser Entwicklung weisen sowohl der motorisierte Individualverkehr (MIV) als auch der öffentliche Verkehr (ÖV) ungenügende Auslastungen auf. Damit werden die vorhandenen Infrastrukturen und Transportkapazitäten sehr ineffizient genutzt. Gleichzeitig schafft der ÖV mit seinem linien- und fahrplanbasierten Angebot ausserhalb der Metropolen und stark frequentierten Korridore keine weitere Verbesserung der Verkehrserschliessung; sein Anteil am Gesamtverkehr stagniert.

Mit Blick auf das weiter steigende Verkehrsaufkommen hat die Verkehrspolitik bis anhin auf einen massiven Ausbau der Verkehrswege gesetzt, mit entsprechenden Investitionen für alle Verkehrsträger. Dabei dienten diese Bauvorhaben weitgehend zur Bewältigung von Spitzenzeiten. Das dabei verfolgte Konzept, mit dem auf Massentransport ausgelegten ÖV-System auch den Service public sicherstellen zu müssen, stösst definitiv an seine Grenzen. Der laufende Angebotsausbau hat dazu geführt, dass die Auslastung im ÖV als Ganzes eher sinkt, da zunehmend wenig wirtschaftliche Linien dazukommen. Damit wurde die eigentlich inhärente hohe Effizienz des ÖV-Systems unterlaufen und die Kosten für die öffentliche Hand nach oben getrieben.

Neu gehen zusätzlich die politischen Stossrichtungen in Richtung Netto-Null-Treibhausgasemissionen bis 2050. Im Rahmen der Energie- und der CO₂-Strategie des Bundes sehen die übergeordneten Ziele zudem eine Verdoppelung des ÖV-Marktanteils vor. Beides ist jedoch nur realistisch, wenn sowohl die Effizienz als auch die Attraktivität des ÖV signifikant verbessert und das Verkehrsaufkommen gleichmässiger verteilt wird. Während die verkehrspolitischen Ziele insgesamt also stimmen mögen, orientieren sich die aktuellen Lösungen noch zu oft an den durchaus erfolgreichen Methoden und Konzepten der Vergangenheit. Die Herangehensweisen der klassischen Verkehrsplanung haben aber ihr Potenzial ausgeschöpft; neue Ansätze sind unbedingt notwendig.

2. Vision für die Mobilität von morgen

Wie soll die Mobilität der Zukunft konkret aussehen? Primärziel muss sein, den Verkehr gesamthaft deutlich nachhaltiger zu gestalten. Immer mehr Wege sollen in effizienten und gut ausgelasteten Verkehrsmitteln zurückgelegt werden. Um das bisher ungebremste Wachstum der Verkehrsleistung pro Person etwas zu dämpfen und dabei den Zugang zu Mobilität sozialverträglich weiterhin gewährleisten zu können, müssen Weglängen konsequent reduziert, die Auslastung der Verkehrssysteme erhöht und verkehrliche Probleme bereits im Ansatz vermieden werden. Damit

¹ Schweizerische Südostbahn AG, Vorsitzender der Geschäftsleitung

² Schweizerische Südostbahn AG, Leiter Geschäftsfeldentwicklung

³ Schweizerische Südostbahn AG, Führungsunterstützung Geschäftsbereich Mobilität

⁴ Schweizerische Südostbahn AG, Leiter Marktentwicklung

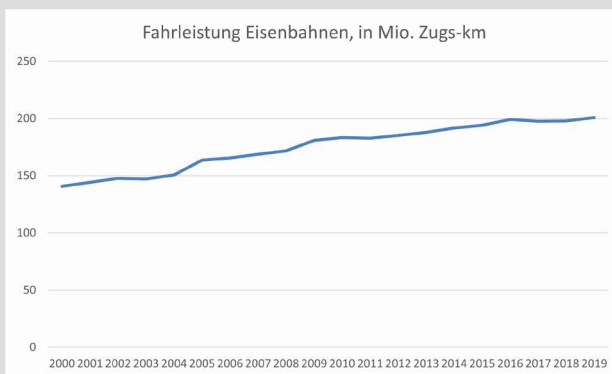
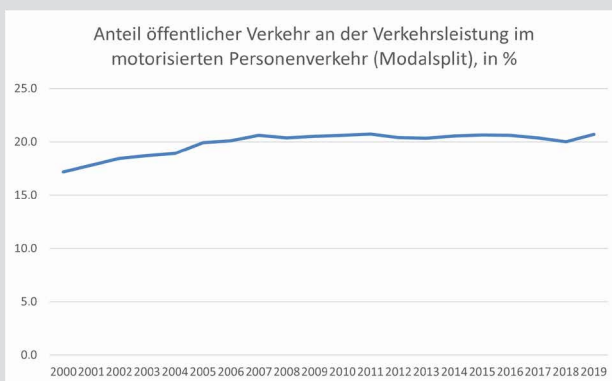
dies gelingen kann, ist eine noch engere Koordination zwischen Verkehrs- und Raumplanung als bisher anzustreben. Zugunsten einer nachhaltigen Mobilität muss eine Entwicklung in Gang gesetzt werden, die nicht nur messbar ist (z. B. durch geringere MIV-Frequenzen oder weniger Flächenverbrauch), sondern sich auch durch ihren sichtbaren Erfolg weiterverbreitet und immer effizienter wird. Nach dem Motto «mehr Mobilität zum gleichen Preis» müssen schliesslich auch eine Kostenreduktion für die öffentliche Hand und eine finanzielle Entlastung der Allgemeinheit erreicht werden.

Doch auf welchem Weg kann dieses ambitionierte Ziel erreicht werden? Gleichauf mit neuen Angebotsformen bedarf es eines Bewusstseinswandels bei den Mobilitätsteilnehmenden, um eine dauerhafte Änderung im Mobilitätsverhalten herbeizuführen. Dies bedingt, dass in der Gestaltung von Angeboten der Mehrwert für die Nutzenden und Nutzniesser:innen absolut im Zentrum stehen muss. Nur positiv empfundene Angebote werden akzeptiert und (wieder) genutzt. Unter dieser Prämisse muss ein integriertes Verkehrs- und Angebotsmodell über Systemgrenzen hinweg entwickelt werden. Damit können Anreize geschaffen werden, dass trotz des Verzichts auf das eigene Motorfahrzeug eine hohe Individualität und Unabhängigkeit sowie eine Verbesserung der Lebensqualität erreicht werden können. Dieser neue «öffentliche Individualverkehr (ÖIV)», welcher ein eigentliches Mobilitätsökosystem darstellt, muss gleichzeitig wesentlich zur Verringerung der schädlichen Auswirkungen des Verkehrs beitragen. Durch eine bessere Effizienz des Gesamtverkehrssystems wird der Energie- und Ressourcenverbrauch im Verkehrssektor nachhaltig gesenkt. Unterstützt wird diese Entwicklung durch die zunehmende Konvergenz der Sektoren Energie und Verkehr.

Der klassische ÖV muss sich hin zu mehr Flexibilität und Effizienz wandeln und ein integraler Bestandteil des neuen Verkehrssystems werden. Gerade das System Bahn bedarf deshalb eines transformativen Wandels. Ein Teil dieser Transformation kann durch technologische Entwicklungen ermöglicht werden. Es müssen neue, durch technologische Fortschritte realisierbare Angebotsansätze, wie

flexible Fahrpläne oder Linienführungen und die Ermöglichung einer kurzfristigen, nachfragegesteuerten Betriebsabwicklung, geprüft werden. Umsteigeverbindungen müssen wo möglich durch Direktverbindungen abgelöst werden. Dies kann beispielsweise mittels Flügelkonzepten mit kleineren Zugeinheiten bewerkstelligt werden. Für die Entwicklung dieser Ansätze bietet sich die Realisierung von Bahnlabors für Feldtests an, um neue Systeme zu erproben und deren Wirksamkeit zu prüfen. Zusätzlich muss aktiv ein neues Tarifsysteem angedacht werden, um auch künftig die Finanzierung der Mobilität sicherstellen zu können. Das bestehende, mittlerweile zu komplexe und Fehlansätze enthaltende ÖV-Tarifsysteem ist für die neuen Herausforderungen der vernetzten Mobilität nicht geeignet und muss daher durch einen neuen Ansatz abgelöst werden.

Zur Vision der Mobilität von morgen gehört aber auch, dass der immer teurer werdende Ausbau der Verkehrsinfrastruktur (Strasse und Schiene) so gesteuert wird, dass er möglichst hohen Nutzen für die neue vernetzte Mobilität bringt und es den Mobilitätsdienstleistenden ermöglicht, tragfähige Geschäftsmodelle aufzubauen. All diese Entwicklungen müssen mit einer vernünftigen Kostenwahrheit einhergehen, sodass der Verkehrssektor seine Kosten zunehmend selbst tragen kann.



Der bisherige Ansatz, den Modalsplit durch einen immer besseren ÖV erhöhen zu wollen, muss mittlerweile als gescheitert betrachtet werden. Der seit den 1980er-Jahren eingeschlagene, zu Beginn durchaus erfolgreiche Weg des laufenden ÖV-Angebotsausbaus hat beim Modalsplit von 20 Prozent sein Ende erreicht. Da die Schweiz ein heterogen besiedelter Raum ist (und bleibt), sind neue Ansätze unumgänglich.

Die (vermeintliche) Bequemlichkeit und der (vermeintlich) günstige Preis der Nutzung des eigenen Autos gelten bislang jedoch als praktisch unüberwindbares Hindernis auf dem Weg zu neuer, alternativer Mobilität. Diese Hürden zum angestrebten Paradigmen- und Verhaltenswandel sind hoch und können nur unter gleichzeitiger Berücksichtigung der Emotionalitäten, Kommunikation und der Schaffung von Anreizen überwunden werden. Nutzerinnen und Nutzer müssen davon überzeugt werden, dass der Verzicht auf den Besitz eines eigenen Fahrzeugs durchaus Mehrwerte generiert und komfortabel sein kann.

Um Anreize überhaupt zu ermöglichen, müssen die Bedürfnisse der Nutzenden in verkehrs- und raumplanerischen Schritten zwingend mitberücksichtigt werden. Zu oft gehen die heutigen Planungen an existierenden Bedürfnissen vorbei und resultieren in Projekten wie Einkaufszentren an der Peripherie (meist grosse Entfernung zu Wohngebieten und somit schlecht erreichbar ohne MIV) oder einem noch weiteren Ausbau des klassischen ÖV in sehr nachfrageschwachen Gebieten und Regionen.

3. Infrastruktur für Freiräume nutzen

Wo liegt dabei die Aufgabe der öffentlichen Hand? Was kann der Staat auf dem Weg hin zu neuen Mobilitätsangeboten realistisch leisten? Um auf übergeordnete Ziele wie die Energiestrategie des Bundes hinzuarbeiten und zur Sicherstellung einer regelmässigen Überwachung der Fortschritte, ist die aktive Partizipation des Staates unabdingbar. Dabei ist es aber auch nicht zielführend, die staatliche Aufgabe der Bereitstellung der notwendigen Infrastruktur in Frage zu stellen.

Gleichwohl liegt es auf der Hand, dass der Staat auf den «tieferen Ebenen» der Angebotsgestaltung nicht mehr alle Aufgaben übernehmen soll. Im lokalen und regionalen Bereich soll sich dieser auf die Sicherstellung einer genügenden Angebotsqualität konzentrieren und nur dort als Besteller in Erscheinung treten, wo dies zur Sicherstellung des Service public notwendig ist. Der klassische ÖV ist dabei auf diejenigen Gebiete und Leistungen zu konzentrieren, welche diesem eine hohe Auslastung und somit eine hohe Wirtschaftlichkeit ermöglichen.

Durch die Anpassungen bzw. Entschlackung entsprechender regulatorischer Rahmenbedingungen müssen unternehmerische Freiräume geschaffen werden, damit sich neue Mobilitätsangebote etablieren können. Nur solche Freiräume und daraus resultierende kreative Lösungen vermögen die verkehrlichen Herausforderungen in weniger dicht besiedelten Räumen, wo die Mobilität aktuell weitgehend durch den MIV bestimmt wird, zu meistern.

Verbunden mit der Rollenklärung der öffentlichen Hand müssen auch Antworten auf die Frage der Finanzierung der Mobilität gefunden werden: Die aktuell bestehenden Finanzierungsmodelle sind nicht zukunftsfähig und lähmen in Folge ihres Subventionscharakters oftmals auch die Innovation. Es wäre hilfreich, neue Modelle der Nutzerfinanzierung anzustreben, wobei die Internalisierung externer Kosten und die Schaffung von vernünftigen Tarifmodellen als massgebende Ziele im Zentrum zu stehen haben. Gleichwohl müssen der Bevölkerung auch weiterhin Erreichbarkeit und Erschliessung zu angemessenen Preisen ermöglicht werden.

4. Vorteile verschmelzen

Während das bisherige Erfolgsmodell des öffentlichen Verkehrs zunehmend bröckelt, führen technologische Fortschritte im Strassenverkehr zu immer mehr Flexibilität, Sicherheit und Komfort und setzen den klassischen ÖV weiter unter Druck. Damit insbesondere der Schienenverkehr auch in Zukunft konkurrenzfähig bleibt, muss er grundlegend überdacht werden. In diesem Sinne ist es auch unumgänglich, dass er sich komplexen Themen wie dem automatisierten Fahren, marktorientierter Angebotsgestaltung und einer Abkehr vom starren 7x20-Stunden-Taktfahrplan widmet. Es bestehen durchaus Chancen für den öffentlichen Verkehr, zumal das Narrativ eines «immer besser werdenden Strassenverkehrs» so nicht korrekt ist: Der angelaufene Shift vom Verbrennungsmotor zum elektrischen Antrieb beim Auto führt zwar zu einer signifikanten Reduktion der Abgasemissionen, doch bleiben die übrigen Nachteile des MIV wie bspw. der grosse Ressourcen- und Flächenverbrauch weiterhin bestehen.

Das grösste Potenzial zur Erreichung eines effizienten Gesamtverkehrssystems liegt in einer erfolgreichen Verschmelzung der Vorteile von ÖV und MIV hin zu einem neuen ÖIV-Ökosystem. Die Realisierung eines ÖIV erfordert die Entwicklung von systemübergreifenden Mobilitätsdiensten und die Schaffung von neuen Angeboten. Der mächtige Motor und Enabler ist dabei die Digitalisierung. Erst die digitale Transformation ermöglicht es, u. a. durch den Aufbau von Mobilitätsplattformen, entsprechende Dienste und die damit verbundenen Geschäftsmodelle Wirklichkeit werden zu lassen. Trotz ihres enormen Chancenpotenzials bringt die Digitalisierung aber auch Risiken mit sich wie z. B. Cybergefahren und löst viele der bestehenden Probleme nicht automatisch.

Die digitale Transformation der Gesellschaft führt zudem dazu, dass sich durch die Schaffung von neuen Lebens- und Arbeitsweisen verkehrsreduzierende Verhaltensmuster rasch entwickeln können. Gerade zu Beginn der Coronavirus-Pandemie war dieser Effekt mit der schnellen Verbreitung von Videokonferenz-Technologien sehr deutlich sichtbar. Die Digitalisierung ist also nicht nur Enabler von Mobilität, sondern kann auch deren Changer sein.

5. Vereinigung verschiedener Verkehrswelten

Die schlechte durchschnittliche Auslastung von ÖV und MIV lässt sich verbessern, wenn sowohl bei den Gestaltenden des Gesamtverkehrssystems als auch bei den Nutzenden ein fundamentales Umdenken und die Verabschiedung von den bisherigen Verhaltensmustern erfolgen. Für die Nutzniesser:innen der Mobilität zeigen und manifestieren sich Mehrwerte aber nur dann, wenn erarbeitete Mobilitätslösungen spezifisch auf die Befriedigung ihrer Bedürfnisse abzielen. Da diese Bedürfnisse mannigfaltiger Natur sind, kann ihre Erfüllung nur durch die Bereitstellung eines vielfältigen Angebots bewerkstelligt werden. Diese Vielfalt an neuen Mobilitätsdienstleistungen ist nur durch die erfolgreiche Zusammenführung der heute noch verschiedenen Verkehrswelten und die Bereitstellung einer durchgängigen und einfachen digitalen Zugänglichkeit möglich.

Soll das Prinzip der vernetzten Mobilität Realität werden, dann muss schon heute damit begonnen werden, anhand von begrenzten Pilotprojekten die für die spätere Migration des Gesamtsystems erforderlichen Erkenntnisse zu gewinnen. Dies kann durch den raschen und sukzessiven Aufbau von lokalen bzw. regionalen Mobilitätsökosystemen schrittweise erreicht werden. Diese lokalen bzw. regionalen Mobilitätsökosysteme sollen aus Sicht der Nutzenden in überschaubaren Perimetern ein vernetztes und integriertes Mobilitätsangebot zur Verfügung stellen. Der Fokus solcher Projekte wird idealerweise sowohl auf dicht besiedelten Gebiete als auch auf Regionen ausserhalb der Ballungszentren liegen. Diese Pilotprojekte sind langfristig auszurichten und unter Berücksichtigung der neuesten Entwicklungen im Digitalisierungsbereich agil weiterzuentwickeln. Ein enger Austausch unter den verschiedenen Pilotprojekten ist zwingend und muss eventuell sogar national koordiniert werden.

Die für den Aufbau von Mobilitätsökosystemen erforderliche digitale Vernetzung kann nur durch die schweizweite – bzw. letzten Endes auch internationale – Zugänglichkeit der verschiedenen Angebote über einheitliche Schnittstellen und die offene Zugänglichkeit zu relevanten Daten (Open Data) ermöglicht werden. Die Nutzung der Schnittstellen, aber auch der Daten muss offen und diskriminierungsfrei sein. Proprietäre Mobility-

as-a-Service-Plattformen, welche primär die eigenen ökonomischen Ziele verfolgen, können sonst die übergeordneten Zielsetzungen unterlaufen und im eigenen Interesse übersteuern.

Eine Abkehr von der «Winner takes it all»-Mentalität und das Antreiben von Kooperation und Partnerschaften mit den entsprechenden Geschäftsmodellen ist erforderlich. Daraus resultiert die Notwendigkeit zum Aufbau und Betrieb einer unabhängigen Schweizer Mobilitätsplattform. Dieser Aufbau muss über eine agile privatwirtschaftliche Organisation erfolgen und vom Staat allenfalls finanziell unterstützt werden. Die sich im Aufbau befindende Nationale Dateninfrastruktur (NaDIM) ist als Grundlagenplattform, mit den standardisierten Schnittstellen und den minimalen Daten- und Funktionsservices, eine wichtige Voraussetzung auf dem Weg zu dieser Schweizer Mobilitätsplattform.

Da grosse Organisationseinheiten, u. a. auch der Staat, tendenziell zu Trägheit neigen, sollte auf dem Weg hin zu neuen Mobilitätsökosystemen weitgehend den bestehenden und künftigen Marktkräften vertraut werden. Die öffentliche Hand muss sich dabei primär auf die Festlegung – und wo nötig Anpassung – der Rahmenbedingungen und auf die Entwicklung der wichtigen Infrastrukturen konzentrieren.

Auf dem Weg zu dieser neuen Welt muss als Erstes das Personenbeförderungsgesetz so angepasst werden, dass die neuen Mobilitätsökosysteme überhaupt möglich werden. Die heutige gesetzliche Grundlage lässt diese aktuell nicht zu bzw. blockiert deren Entwicklung zu stark.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Die Mobilitätswelt von (über-)morgen und die damit verbundenen Herausforderungen und Möglichkeiten lassen sich nicht punktgenau vorher sagen, aber weitgehend erahnen. Technologische Fortschritte, neue Angebotskonzepte und innovative Geschäftsmodelle haben das Potenzial, die zur Erreichung der übergeordneten Ziele (Reduktion Emissionen, Energie und Flächenverbrauch) notwendigen Effizienzsteigerungen zu ermöglichen. Dabei ist zentral, dass die durch die digitale Vernetzung aller Verkehrsträger angestrebten Mehrwerte durch Pilotprojekte rasch aufgezeigt, optimiert und dann auf das gesamte Verkehrssystem übertragen werden können.

Effects of automated driving – A framework for action

Hauke Fehlberg¹

1 Introduction

Digitalization will fundamentally change mobility over the coming years and decades. The impact of automated vehicles (AVs) is likely to be particularly strong. Their use offers considerable opportunities, but also poses risks. The consequences will depend mainly on whether people use vehicles collectively or individually.

The Swiss Federal Roads Office (FEDRO) has been dealing with these new challenges for several years. As part of its activities, it has carried out a research programme entitled «Impacts of automated driving». The results of the programme showed clearly that public authorities cannot simply play a passive role and leave the introduction of AVs solely to the market. The authorities will have to intervene at an early stage of deployment and track subsequent developments so that they

can steer foreseeable developments in the desired direction.

This article presents the key essential findings from the research done by the seven sub-projects and deduces a framework setting out principles for action (FEHLBERG, H. and S. PIRKELBAUER 2020). It outlines possible measures from the perspective of the Swiss national authority responsible for road traffic and road infrastructure.

2 Essential findings and principles for action

2.1 Penetration of AVs in the Swiss vehicle fleet

To assess the level of AV penetration, a Swiss vehicle fleet model was developed by sub-project 5 (BUSCH et al. 2020). To obtain the necessary assumptions, the group analysed the driving forces that had been identified and made an estimate of temporal and spatial AV penetration (level 4 and 5) for the period between 2020 and 2050. Technology availability, spatial regulation and AV approval were also factored in. These factors were expected to be a key determinant of service life or ageing and thus also of AV penetration in the Swiss vehicle fleet.

Assumptions about the characteristics of different driving forces were used to develop migration scenarios, which – assuming that the first automated vehicles (level 4) will be available from 2025 – were modelled for the time steps within the period (2030, 2040 and 2050)² using a cohort model. With the help of this custom-developed fleet model, the numbers of different forms of AV in the Swiss vehicle fleet and their growth over time were estimated and quantified using various scenarios. A trend scenario, pro-sharing scenario and corresponding extreme scenario were developed. The results of the trend scenario (Fig. 1) and of the extreme scenario (Fig. 2) are presented on the next page.

¹ Swiss Federal Roads Office

² The impact of mixed traffic on the safety and functionality of the transport system was also investigated.

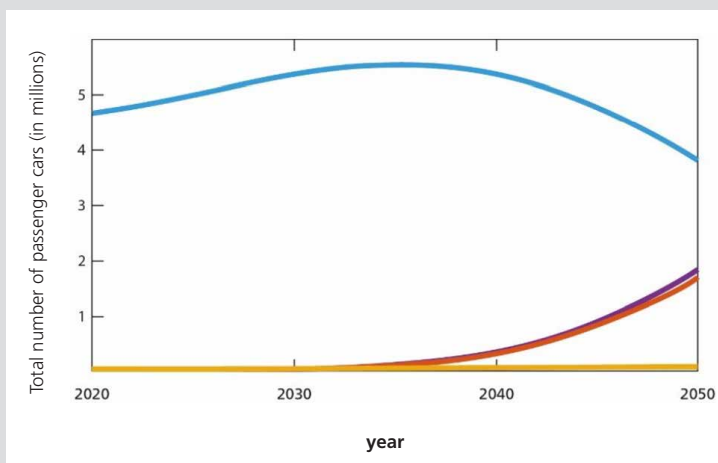


Fig. 1: Estimated number of passenger cars in Switzerland according to the trend scenario (cf. Busch et. al 2020).

manually driven vehicles	automated sharing vehicles
automated vehicles (total)	automated private vehicles

The trend shown in Figure 1 would result in the following shares of the Swiss vehicle fleet for 2050 (Tab. 1):

Vehicles	Share of Swiss vehicle fleet in 2050 (%)
Manually driven	68
Automated driving system (total)	32
<i>automated private</i>	31
<i>automated sharing</i>	0.9

Tab. 1: Shares of the Swiss vehicle fleet in 2050 under the trend scenario (cf. Busch et al. 2020).

Table 1 illustrates that unless specific measures are taken, more than two thirds of road vehicles will still be manually driven in 30 years' time. Given the combination of automated and manually driven cars likely to prevail at this point, this long period might have a negative impact on road safety.

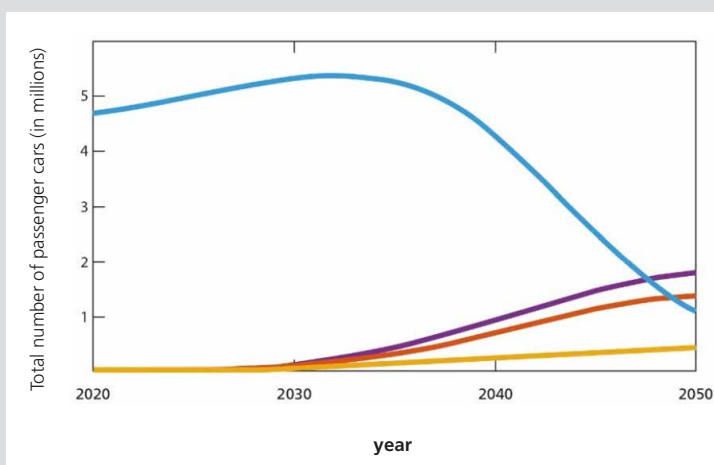


Fig. 2: Estimated number of passenger cars in Switzerland according to the extreme scenario (cf. Busch et al. 2020).

manually driven vehicles	automated sharing vehicles
automated vehicles (total)	automated private vehicles

Table 2 depicts shares of the Swiss vehicle fleet in 2050 under the extreme scenario. The extreme scenario was intended to investigate the sensitivity of the fleet reaction to specific measures (indicated by the use of extreme parameters). In comparison with the trend scenario, the results below reveal a high level of AV penetration. This means that it should be possible to accelerate the fleet penetration of AV by taking appropriate action. However, no specific measures were investigated.

Vehicles	Share of Swiss vehicle fleet in 2050 (%)
Manually driven	37.8
Automated driving system (total)	62.2
<i>automated private</i>	47.6
<i>automated sharing</i>	14.6

Tab. 2 Shares of the Swiss vehicle fleet in 2050 under the extreme scenario (cf. Busch et al. 2020).

In addition to the fleet model, the group regarded AV approval for the different road types as a key parameter in evaluating the temporal and spatial penetration of automated vehicles. Once the relevant factors had been identified, the chronological sequence for full AV usability on different road types for level 4 was predicted. It was expected that AVs will be allowed on motorways and comparable high-capacity roads (HCRs) by 2030 (as well as selected inner-city areas), on all urban roads by 2040 and on remaining roads (main roads (MRs) out of town) by 2050.

The results of this modelling exercised showed that highly and fully automated vehicles will take much longer to penetrate the Swiss road vehicle fleet than previously expected. Depending on the assumptions made, humans will still be driving 40 to 70 percent of vehicles in 2050. However, the wide percentage range indicates that specific measures could influence the rate of fleet penetration.

Consequently, Switzerland must prepare for a long mixed traffic phase on roads outside settlement areas. This will comprise automated as well as conventionally driven vehicles. Urban areas will present a permanent challenge because pedestrians and cyclists will always be mixing with AVs. In both cases, solutions that will enable all road users to co-exist safely will have to be developed.

2.2 Effects of AVs on the Swiss transport system

Sub-project 2 (AXHAUSEN, K. et al. 2020) was tasked with identifying and quantifying the possible positive and negative effects of automated driving on the Swiss transport system, especially its road infrastructure. This group simulated mode choice, route choice and departure time choice. The agent-based traffic model MATSim was applied to certain scenarios. One nationwide scenario with no automated vehicles and two nationwide scenarios with automated vehicles were created as a basis. Four years – 2020, 2030, 2040 and 2050 – were simulated.

As a result of the appeal of AVs – and their low cost in the case of automated taxis – it was found that unrestricted use of AV will lead to excessive additional traffic. Cities and conurbations in particular will be unable to cope with this traffic. To prevent such a development, collective use of highly automated vehicles should be promoted. In addition, there is a need for effective instruments to influence the demand for transport.

In general, automated vehicles have the potential to contribute to more efficient use of traffic space. However, sub-project 2 found that a high level of AV penetration is necessary to exploit this potential, and this penetration will not be sufficient by 2050 to eliminate the foreseeable bottlenecks in the road network. AV use and a greater number of collectively used self-driving cars might increase available road capacity and ease the congestion problems on motor ways and secondary roads. However, simulations show that the introduction of AVs will not eliminate bottlenecks because of ongoing traffic growth. Their gradual introduction will require a greater degree of operational flexibility on motorways, something that will demand customized expansion of the road network.

2.3 Collective use of AVs to raise AV occupancy rates

Digitalization and automation are facilitating new and promising forms of collective mobility (JERMANN et al. 2020). New transport options are making it possible to address mobility in a more efficient way. Sub-project 4 developed a new methodology for developing and evaluating possible future forms of service for both passenger and freight traffic.

The most successful form of service was one equivalent to today's car sharing. However, other forms of car- or van-based service may also be able to tap into the substantial user potential during the period examined (cf. 2.2). This development might reduce the need to purchase a privately owned automated vehicle. To achieve this vision, however, the authorities would have to approve the use of highly automated vehicles for commercial collective transport services. These services should be fully integrated into the multimodal mobility system.

Automated vehicles will reduce the cost – and therefore enhance the attractiveness – of individual mobility. Collectively used automated taxi fleets will thus create considerable competition for classic public transport, even in densely populated areas (AXHAUSEN et al. 2020). To remain competitive, public transport must consistently leverage digitalization and automation to further enhance both its efficiency and its services. Public authorities must therefore introduce effective control instruments and bolster the competitiveness of collectively used mobility offerings.

Increasing occupancy rates by measures such as ride pooling, is a key in managing mobility with AV. Ride pooling and on-demand services will only bring potential passengers together to a large extent when they achieve significantly greater public acceptance.

2.4. Predictive traffic management

Sub-project 4 conducted a comprehensive survey of data management in the context of automated driving. They found that automated vehicles generate comprehensive and partly new data sets (HEIMGARTNER et al. 2020). Data sets on vehicle movements and car users' destinations are of particular interest. These data sets, together with the option of exerting direct influence on automated vehicles by remote control, create fresh potential for predictive and more effective traffic management. This potential should be exploited across all modes of transport.

2.5 Spatial impact of AVs

Since there is widespread concern that automated driving could accelerate urban sprawl in Switzerland, sub-project 6 studied the spatial impact of AVs (DEL DUCE et al. 2020). They found that the professional activities of about one third of Swiss commuters cannot be carried out in a car. Furthermore, the results showed that the length of a typical commuter route, the time needed to travel it and the amount of motorway driving involved would make working in a car impractical.

Thus there is limited potential for using commuting or other travel time to work in an AV in a small and mountainous country such as Switzerland. Automated driving in Switzerland is therefore very unlikely to become an important driver of rural sprawl. Nevertheless, spatial development continues to be monitored.

2.6 Reliability of results

At present, it is not possible to predict what impact automated vehicles will have in the future. Research results are based on justified estimates and assumptions about the conditions for highly automated driving. Those concerned will have to display a high level of agility in dealing with these uncertainties. The validity of the assumptions will have to be periodically reviewed.

Authorities must be able to gain real-life experience of the use of (highly) automated vehicles on Swiss roads in order to be able to define a framework within which AVs can be launched appropriately and formulate regulations that look likely to be effective.

3 Desirable mobility development with automated vehicles

Looking ahead to 2050, the vision for Switzerland's road traffic system set out below represents a desirable state as regards AV (OEHRYS et al. 2020). By focusing on the traffic-related aspects of automated driving, it keeps the complexity of the vision manageable.

By 2050, connected and automated vehicles will be handling passenger and freight transport in Switzerland. A data network operated jointly by the stakeholders will provide the necessary data and information for safe AV operation. Fall-back functions will be available should the automated driving system fail.

The consistent promotion of collectively used AV will accelerate vehicle fleet renewal and shorten the mixed-traffic phase on motorways and inter-urban roads. AVs' high level of fleet penetration of AV will ensure that capacity on these roads is used well and road safety is substantially increased.

In urban areas, mixed traffic with pedestrians and cyclists will present a special and ongoing challenge. In these areas, AVs will be subject to special regulations that take account of the high density and diversity of road users.

All road users will be aware of AVs' special features. They will have the information needed to behave safely around AVs. To counter the increased risk associated with the deployment of AVs, traffic will be monitored more closely during these phases and individual vehicles will receive corrective action if necessary.

Support for ride pooling will have helped establish collectively used AV taxis. These new, on-demand services will be so convenient and cheap that very few people have their own AV. This form of commercial collective transport will have become an established third mode of transport in the space between private individual transport and classic public transport. The new service will be integrated into the multimodal mobility system.

The most critical sections of the high-performance road network will have been improved in line with the federal government's infrastructure programme. Additional lanes will have been reserved for AVs with a high occupancy rate. Should the situation deteriorate again, only automated and high occupancy vehicles will be allowed on critical sections of the national road network.

Traditional public transport will have consistently used digitalization and automation to further improve its services and reduce production costs. Rail will still be the transport mode of choice for longer and combination transport services. In urban and rural areas, smaller but much more flexible and demand-driven offerings will have supplemented and partly replaced existing public transport offerings.

Public authorities will monitor price trends for transport services very carefully, intervening if a price gap opens up between individual and collective transport. The productivity effects of automation will help them to do so. The monetary effects of efficiency gains can be progressively used to internalize the external costs of transport. The authorities will use higher charges to influence people's transport behaviour for the benefit of all.

Traffic management in Switzerland will be the responsibility of neutral authorities that have no profit motive. Using predictive traffic management, transport service use will be optimized for all modes of transport and road networks. All road users will benefit equally from the improvements achieved.

The transport system will be internationally coordinated. There will be cross-border traffic and it will also be possible to import automated vehicles. The authorities will be constantly gathering real-life experience of automated vehicles on the public road network. This will enable them to design the necessary measures and regulations in a reasonable and moderate manner.

4. Areas for action

Politicians and public authorities should take action in five areas to guide the impact of automation towards the vision outlined above:

a. Enabling the use of automated vehicles: It should be possible to use automated vehicles in Switzerland at an early stage. For this reason, it is necessary to create regulatory framework and align it with public needs. At the same time, the authorities will have to prepare the infrastructure and operational conditions needed to ensure safe use of automated vehicles. Setting up a data network operated jointly with other stakeholders will deliver the data needed for automated driving. These activities will provide the foundations of further government action.

b. Ensuring safe handling of mixed traffic and shortening its persistence: Switzerland must prepare for a long mixed-traffic phase on its motorways and interurban roads. Within urban areas, automated vehicles will have to cope with pedestrians and cyclists on a permanent basis. Provisions must be made to ensure that all road users can coexist safely at all times. Simultaneously, a framework that will allow (highly) automated vehicles to penetrate the Swiss vehicle fleet as quickly as possible will have to be created.

c. Promoting collective use of AVs and integrating them into the transport system: Automated vehicles should be used collectively to the greatest extent possible. The existing regulatory framework must be adapted to allow the emergence of new collective forms of service in commercial private and public transport. In addition, the public sector should create conditions that facilitate the integration of collectively used automated vehicles into the overall transport system.

d. Ensuring efficient use of traffic infrastructure: The potential of automated vehicles to ensure existing traffic infrastructure is used more efficiently must be consistently exploited. It is particularly important to achieve a high penetration of highly automated vehicles on motorways and interurban roads soon. Fleet penetration must be supported by providing the necessary operational flexibility on the high-capacity road network. The additional data and information available from AVs should be used to operate a predictive, cross-modal traffic management system.

e. Using new forms of service will strengthen traditional public transport: Where traffic flows can be combined, rail services should be further expanded. Surface transport should facilitate the enhancement and possible replacement of existing classic public transport offerings by new, more demand-oriented and cost-effective ones. Incentives should be created in support of this development. Concurrently, the public sector should ensure that mobility does not become even cheaper as a result of automation and that a price gap does not open up between individual and collective transport. The public sector should use the charges to manage transport more effectively.

In the dynamic and highly uncertain environment of automated driving, measures must be implemented with a high degree of agility, characterized by responsible experimentation, rapid action and the timely implementation of necessary corrective measures.

5. Measures to achieve desirable mobility trends with AVs

Measures will have to be implemented in each action area.

The authorities will have to cooperate closely with all relevant stakeholders to enable the deployment of AV. Scientific and socio-economic basic knowledge of automated driving will have to be expanded so that regulations can be prepared on rational grounds. A public information campaign on AVs and their impact should encourage public involvement in the discussion on AVs. Measures to permit connectivity between AVs and between AVs and infrastructure will be crucial to the success of AVs and cooperative driving. This means that the digital infrastructure for automated driving will have to be provided by the public authorities and business.

Mixed traffic – a combination of AVs and manually driven cars – may jeopardize road safety. Safe management of mixed traffic and minimizing its persistence are therefore crucial not only for road safety, but also to safeguarding adequate traffic flows. Action is therefore needed in these two areas. The most important way of overcoming an extensive mixed traffic phase is to shorten it by controlled acceleration of AV fleet penetration.

Increasing numbers of cars on the roads and the intensified use of AVs will lead to road congestion. One possible area of action would be to increase vehicle occupancy rates. The authorities should therefore encourage collective use of automated vehicles and the integration of innovative on-demand mobility offerings into the multimodal mobility system.

At the same time, it seems necessary to further strengthen public transport. Public transport offerings will have to be expanded and improved and an effective pricing system will have to be introduced.

It will only be possible to exploit the potential to make efficient use of the existing road network and increase operational flexibility if remaining bottlenecks are eliminated. The introduction of AVs will not be sufficient to resolve this problem. Such measures should be accompanied by continued development of predictive traffic management.

Since AVs are not yet on Swiss roads and most predictions of their impact are based on assumptions, the approaches and procedures adopted will have to be agile – as will legislation. During the day-1 deployment phase, highly automated vehicles will have to undergo real-life under Swiss conditions. The authorities and public will have to gain experience of dealing with AVs.

6. International legal framework and standards for automated driving

International and national bodies are shaping the framework for highly automated driving. This is particularly difficult for public bodies because – apart from experimental vehicles – no standard-production cars of SAE level 4 are as yet available and it is impossible to observe real complex interaction with other road users.

As a result, public bodies have to base their work on a large number of assumptions, which in turn feed into their assessments of future traffic development. These assessments are used to construct the technical and legal framework. As AVs appear on the roads in the future, this framework will have to be re-evaluated.

International cooperation will be essential in ensuring cross-border traffic is continuously possible and in ensuring that the new traffic system with highly automated vehicles functions correctly. International organizations will play a major role alongside national bodies.

6.1 UNECE

At international level, the United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) is at the centre of the legal and regulatory work needed to facilitate the mass introduction of autonomous vehicles on the roads. UNECE is helping to enable automated driving functionalities by hosting the Multilateral Agreements and Conventions governing the requirements for and the use of these technologies. The relevant forums (e.g. GRVA,

WP.1 and WP.29) are following technical progress with the aim of ensuring that the benefits of these new technologies can be harnessed without compromising safety or other progress achieved over recent decades (e.g. border crossing, interoperability etc.).

The forums' work has resulted in

- policy documents, the latest of which is the New Assessment Test Method for automated driving or the Data Storage System for Automated Driving for ALKS (automated lane keeping systems),
- vehicle regulations for automated and for connected driving (WP.29) and
- within the Road Traffic Safety framework (WP.1), the amendments to the 1968 Vienna Convention on Road Traffic and the 1949 Geneva Convention on Road Traffic.

6.2 Legal situation in other countries

Some European countries have made initial changes to their regulations as regards highly automated driving (level 4). Like Switzerland, other countries are also preparing to modify their road traffic regulations and related areas of law. Most autonomous driving legislation is an interim solution until harmonized regulations are in place at international level.

France

In July 2021 France modified its criminal liability regime so as to exempt drivers from liability once the automated driving system is operating in accordance with its operating conditions. The conditions governing interaction between the driver and the automated driving system have also been defined, as have the emergency manoeuvres that the system may have to perform automatically. Finally, the level of attention expected from drivers with regard to their driving environment when a driving system is activated has been established.

The licensing procedure centres around the safety case for these systems, which has to be provided before initial operation. It is carried out on the basis of several safety cases, which are checked by approved qualified organizations.

These statutory modifications make it possible to travel by automated vehicles up to level 4 on pre-defined routes or zones in France from September 2022. The French legal framework was designed to be complementary to the European framework for vehicle approval, which is currently being modified to accommodate the growth in automation.

Germany

In Germany, the Act on Automated Driving (Amendment of the Road Traffic Act) entered into force at the end of June 2017. This focused primarily on the changes in the rights and obligations of vehicle drivers during automated driving. Automated systems (level 3) are permitted to assume the task of driving under certain conditions. While a driver still present, he or she is not obliged to monitor traffic events when the vehicle is in automated mode.

The new German Law on Autonomous Driving, which came into force at the end of July 2021, created the legal framework under which autonomous motor vehicles (level 4) will be able to drive in regular operation in defined operating areas in national public road traffic.

Driverless motor vehicles can operate under a maximum number of application scenarios. These are locally limited to a defined operating area and there is no definitive prior regulation of the different use cases. Individual permits, exceptions and requirements, such as the presence of a safety driver who is always ready to intervene, are thus unnecessary.

Switzerland

The Swiss Road Traffic Act (Strassenverkehrsgesetz) is being revised and is at the consultation stage. It is proposed that the government should regulate the conditions under which drivers of a vehicle with an automation system are exempted from their driving duties and the extent to which they are exempted. There must also be no impairment of road safety. Under the proposed modifications, vehicles with an automation system that does not require a driver may only be admitted on certain routes. The admission requirements will be determined by the government. Driving mode memories must be used so that responsibilities with regards to automated vehicles can be determined, especially after accidents.

United Kingdom

The Law Commission for England and Wales and the Scottish Law Commission are conducting a review of driving legislation to enable the safe deployment of automated vehicles on UK roads. This review will continue until the end of 2021. Changes to the Highway Code have been proposed to support the safe use of Automated Lane Keeping Systems (ALKS) and to ensure clear delineation of responsibilities between the driver and the vehicle. The ALKS will be a commercially available level 3 system capable of allowing the driver to safely hand over control to the vehicle.

United States of America

The overarching, federal AV START Act drafted by the National Highway & Traffic Safety Administration (NHTSA) and the US Department of Transportation (DoT) is already before both chambers of the US Congress. In February 2021, Congress lawmakers were making a renewed effort to pass legislation that would create federal safety and security standards for autonomous vehicles. The bill will primarily establish a framework for the federal government's role in ensuring the safety of highly automated vehicles (HAVs) and will pre-empt any attempt by the States to adopt, maintain, or enforce any law, rule, or standard governing HAVs or automated driving systems (ADS) on the basis of certain safety evaluation report subject areas. Without passing the bill, States may begin setting their own rules of the road.

Meanwhile, to support industry innovators and States in their efforts to deploy this technology, while at the same time informing and educating the public, and improving roadway safety, NHTSA has launched its publication "Automated Driving Systems: A Vision for Safety". This document offers a non-regulatory approach to automated vehicle technology safety.

6. Conclusion

Highly automated driving is still at the development stage. As yet, the capabilities of AVs and the time at which standard-production AVs will arrive on the roads are still unknown and the only indication is from advertising. This concerns the public as much as the authorities. The very high investments enormous research effort going into automated vehicles suggest that they will be made available in the medium term. Appropriate regulations must be in place by then. This means that the planning of measures for AV cannot wait until they are deployed. Such planning has to be based on estimates of the effects of AV derived from assumptions. FEDRO's «Effects of Automated Driving» research programme constitutes this base.

It has become apparent that the introduction of automated driving will require more time than originally assumed. This means that high-risk mixed traffic is likely to persist on Swiss roads for decades unless the AV penetration process is accelerated. Since highly automated driving is likely to become very attractive, a sharp increase in traffic volumes on the roads is to be expected. The only prospect of improvement is increases vehicle occupancy rates; otherwise, other radical measures may be necessary.

The aim should therefore be to use AVs as collectively as possible, something that becomes highly attractive if AVs are integrated into the multimodal mobility system. As a result, collectively used AVs could become an important alternative to private AV ownership not only in urban, but also in rural areas.

In the long term, however, the benefits of AVs outweigh the disadvantages. Switzerland must anticipate and adapt to the new situations that will arise. The framework for action provides guidance for doing so.

References

- Axhausen, K. W., Livingston, C., Hörl, S., Bruns, F., Fischer, R., and B. Tasnády (2020) Auswirkungen des automatisierten Fahrens; Teilprojekt 2; Verkehrliche Auswirkungen und Infrastrukturbedarf. Forschungsprojekt ASTRA, Report 1683.
- Busch, F., Krause, S., Fehn, F., Richner, M., Armbruster, S., and T. Winzer (2020) Auswirkungen des automatisierten Fahrens; Teilprojekt 5: Mischverkehr. Forschungsprojekt ASTRA, Report 1684.
- Del Duce, A., Trachsel, T., Hoerler, R. (2020) Auswirkungen des automatisierten Fahrens; Teilprojekt 6: Räumliche Auswirkungen. Forschungsprojekt ASTRA, Report 1680.
- Fehlberg, H. and S. Pirkelbauer (2020) Auswirkungen des automatisierten Fahrens; Teilprojekt 0: Erkenntnisse und Massnahmen aus Sicht ASTRA, Report 1691.
- Heimgartner, C., Lämmer, S., Orlando, A., Paulsen, T., Rausch, M., Bätzner, A., Backhaus, W., Gyergyay, B., and T. Kohli (2020) Auswirkungen des automatisierten Fahrens; Teilprojekt 3: Umgang mit Daten. Forschungsprojekt ASTRA, Report 1694.
- Jermann, J., Steinle, M., Luisoni, A., Bohne, S., Schweizer, N., and T. Schmid (2020) Auswirkungen des automatisierten Fahrens; Teilprojekt 4: Neue Angebotsformen. Forschungsprojekt ASTRA, Report 1692.
- Oehry, B., Jermann, J., Bohne, S., Frick, R., Ickert, L., Greinus, A., Schippl, J., Fleischer, T., Reichenbach, M., and M. Hömke (2020) Auswirkungen des automatisierten Fahrens; Teilprojekt 1: Nutzungsszenarien und Auswirkungen. Forschungsprojekt ASTRA, Report 1681.

Automated driving in Switzerland – safety challenges of mixed traffic

Markus Deublein¹

1. Introduction

Automated vehicles are the focus of future road safety management.

Around 3,900 serious traffic accidents were recorded on Swiss roads in 2019. Police accident records show that 95% of these accidents were due to human error [1]. Like the European “Vision Zero” programme [2,3], Switzerland’s “Via sicura” package of measures aims to significantly reduce the number of fatally and seriously injured road users [4]. A triangle of safety factors is at the core of this approach to integrated safety management: humans (drivers/road users), the environment (road infrastructure) and vehicles (technological developments). Under the Safe System Approach [5], modern safety management is taking increasing account of the fact that human road users are physically vulnerable and pro-

ne to errors. In response to this, technical systems should be designed and constructed in a self-explanatory and forgiving manner – a demand that is increasingly being placed on road infrastructure and car manufacturers.

It is undisputed that there is vast potential for avoiding road accidents under certain conditions and beyond a certain level of automation in the vehicle fleet [6]. The connected vehicles of the future will use advanced sensors and intelligent control algorithms to help drivers perform the dynamic driving task. The primary driver of software-based technological development in automated vehicles is modern, computer-aided algorithms based on artificial intelligence. Such automated vehicle control would not be susceptible to distraction, emotion, fatigue, poor or impaired judgment or cognitive impairment. Perception of the road environment and other road users will be enhanced by sensor-based observation and software-based processing that improve on human perceptibility. In comparison with humans, their computing and decision-making would require very little time and could not only help prevent accidents, but also speed up the rescue process after an accident (e.g. e-call functions).

However, scientists also agree that developments in automated driving in no way guarantee accident-free road traffic in the future, given that the unique traffic situations created by mixed traffic will present new road safety challenges. For many drivers, safety may not (yet) be the key criterion when purchasing a vehicle with advanced driver assistance or vehicle automation systems. As yet comfort features are still dominant. However, ensuring safety - at least at today's level - is the central criterion for socio-political acceptance of automated driving. This technology be able to establish itself in the foreseeable future unless road safety considerations are adequately taken into account in the context of automated driving and the appropriate course is set in good time. Only then will it be possible to reap the hoped-for economic, safety and environmental benefits of future mobility.

¹ Research Associate, BFU

From a current perspective, there is likely to be a decades-long transition phase until highly automated vehicles account for a substantial share of the Swiss vehicle fleet. Some experts estimate it will be 10 years before SAE-L5 vehicles are launched. However, a growing number of European and American experts believe it may take more than 50 years [7,8]. During this period, particular attention must be paid to road safety due to the heterogeneity of mobility forms and the associated complexity of interaction [9–14].

After the initial technological euphoria that predicted the use of automated vehicles by the end of the last decade subsided, most vehicle manufacturers and transportation companies had to revise their forecasts. Some vehicle manufacturers are even questioning the feasibility of unrestricted, fully automated driving at SAE-L5. The ERTRAC (2019) Roadmap for Automated Driving [15] provides a comprehensive overview of the different functionalities of automated vehicles and a timeline for the anticipated market launch of these functionalities in Europe. The CAR-TRE project compiled an additional library of the latest developments in the fastchanging field of connected and automated driving [16].

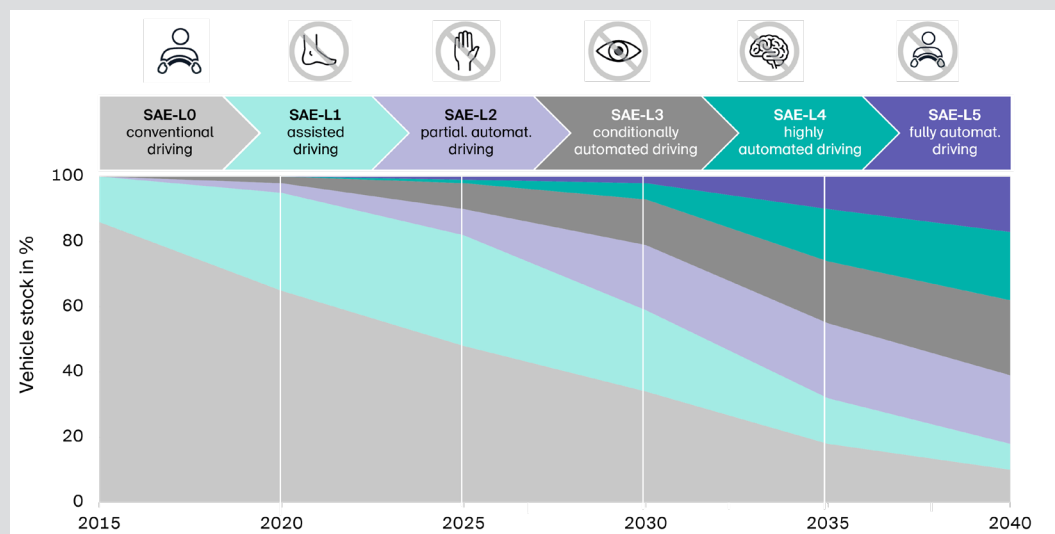
Although the use of automated vehicles is currently somewhat delayed, the number of vehicles with automated driving functionalities is growing.

When discussing the subject of automated driving and related predictions of future developments, it is important to distinguish between the levels of automation and the different driving automation systems. Furthermore, vehicle technology takes time to develop. Figure 1 summarizes the results

of the above-mentioned time estimate for automated vehicle market penetration. The graph indicates that the expected safety gains from automated driving will only have a marginal impact in real-world traffic for a longer period of time. Whether we will ever see a situation where our roads are entirely populated by fully automated vehicles is still unclear and will depend on future technical and socio-political developments and objectives.

A long transition period is to be expected until day-to-day traffic contains a perceptible share of highly and fully automated vehicles, and vehicles with varying degrees of automation will have to share road space during this time. In this transitional phase, mixed traffic composed not only of motorized and non-motorized road users, but also of conventional and automated motorized road users, will represent a major challenge in terms of traffic planning and traffic safety management. Mixed traffic is defined as the coexistence of conventional vehicles with vehicles featuring varying degrees of automation in which pedestrians, bicycles and public transport are simultaneously present. If current air traffic regulations were to be applied to road traffic, there would ideally be enclosed traffic areas with externally controlled traffic monitoring and control for the areas in which automated vehicles operate. Depending on their level of automation, vehicles could then be registered within their defined operating areas and monitored as a function of their driving task [17]. The challenges posed by mixed traffic vary according to the transport network. On high-perfor-

Figure 1: Timeline of the transitional phase with marked mixed traffic of vehicles of different stages of automation; combination of estimates from Altenburg (2018), ERTRAC (2019) and EBP Schweiz AG (2019) [46,15,17]



mance road network routes, the registration of certain types of vehicles is already restricted and there are both maximum and minimum speeds. A mixture of automated and conventional vehicles will be feasible in such areas of operation in the near future, provided that all road users are able to recognize automated vehicles as such. The situation is different on urban roads and roads outside urban areas. Here, the traffic safety demands that automated vehicles will have to fulfil when interacting with other road users in mixed traffic are significantly greater [17].

3. Safety challenges in mixed traffic

Alongside the anticipated positive effects of increasing vehicle automation in road traffic, new challenges for road safety are to be expected.

3.1 Basics

The presence of automated vehicles in which the human user is no longer or only partially involved in the driving task means that currently established patterns of behaviour and communication will no longer work. Frictionless coexistence in different mixed-traffic constellations will require a basis for cooperation and communication that all road users will be able to intuitively understand and respond to. There will be a shift from human-to-human interaction to complex human-machine interaction involving conventional and automated vehicles in mixed-traffic situations [18] (see Figure 2). The challenges associated with an increase in vehicle automation in mixed road traffic stem from the driver progressively shifting from being the vehicle's driver to being its supervisor. On the one hand, the technical systems relieve drivers of the driving task. On the other hand, however, depending on the level of automation, drivers still have to remain fully vigilant and ready to resume their role at a fallback level if the vehicle automation system reaches its limits in a particularly complex traffic situation. Moreover, to get the expected safety gains from increasing automation on the road, drivers will have to be aware of their vehicle's capabilities and limitations and be able to deal with them effectively.

3.2 Level-dependent impacts on road safety

A report by the Forum of European Road Safety Research Institutes FERSI (2018) [19] states that advanced technologies and systems are already capable of delivering substantial safety gains at the lower end of the SAE automation levels. Driver assistance systems such as automated emergency braking (AEB) can prevent accidents in critical situations or at least mitigate their severity. This is achieved by reducing the vehicle's speed or even stopping it if a collision with another object is unavoidable. The overview provided by Winner et al. (2015) [20] shows that – for passenger cars and in relation to all passenger car accidents investigated – emergency brake assist delivers the greatest (isolated) safety effect of all driver assistance systems investigated, with an estimated potential to reduce accident rates by almost 18%. If accidents involving pedestrians and cyclists are also taken into account, this figure could even rise to 43.5% [20]. At speeds below 50 km/h, AEB is capable of halving the risk of rear-end collisions [21]. A comprehensive assessment of the safety impact of modern driver assistance systems can also be found in ERSO (2018) [22].

Systems at automation level SAE-L2 (“partial automation” based on a combination of adaptive cruise control and active lane keep assist) are already available in newer vehicles. While there is still insufficient empirical evidence on the effectiveness of these systems, they are expected to make a significant contribution to preventing rear-end collisions and lane-change collisions caused by human inattention and/or poor visual observation of the environment by the driver. For example, adaptive cruise control combined with an automatic emergency braking assistant alone, is expected to help prevent conflict situations from occurring in the first place. However, the field trials carried out to date have failed to clearly demonstrate an effect

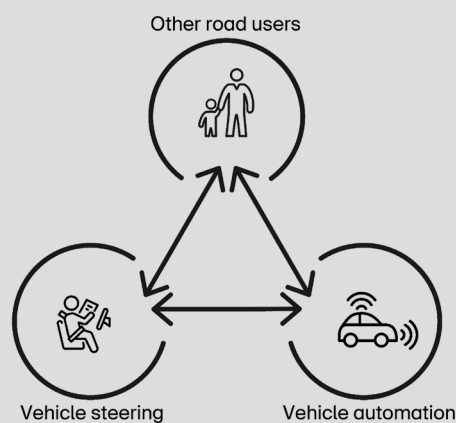


Figure 2: Shift from human-human interaction to human-machine interaction with automated vehicles (author's own presentation based on Amditis (2019) [18]).

of this kind. Another promising technology at automation level SAE-L2 is intelligent speed control, which is also capable of reducing accidents and their impact on vulnerable road users (pedestrians and cyclists) [23]. At the same time, however, new hazard scenarios may emerge at SAE-L2. The most common risks discussed here are those arising from the tiring job of continuously monitoring the driving task.

At automation level SAE-L3, it is particularly safety-critical that the vehicle be able to return control to its driver very quickly when it reaches its system boundaries (e.g. in excessively complex traffic or weather situations). The human driver remains the system's fallback level, even if there is only a very short period of time (a few seconds) to hand over the driving task. Moreover, the automated vehicle will always ask the driver to take over the driving task if it is unable to find a safe solution to an impending traffic situation. This creates a safety-critical doubling effect. Such handover situations, in tandem with overestimation of human capabilities, particularly alertness and readiness for action, may create new accident risks in road traffic. Drivers' response times are comparatively long, typically at least approximately 4–6 seconds [24]. The ability of a human driver to react appropriately in a given situation is severely restricted for an even longer period of time. This time increases further if the driver is engaged in a secondary activity (such as reading or watching TV). Automated vehicle systems operating at SAE-L3 can therefore cause safety problems if drivers overestimate both the range of the vehicle's sensors (and thus the available handover time) and the reliability of its systems. Some studies show that most users do not understand how the systems they use work and do not even know if they are active or not [25]. This is something that driver training for new dri-

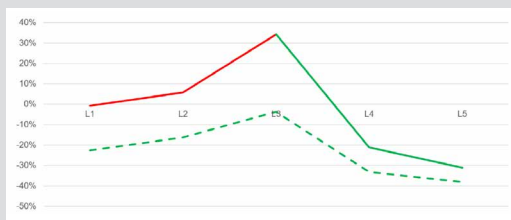
vers and training/awareness raising for other road users and experienced drivers needs to address. Practising and testing critical handover situations could be integrated into driver training on driving simulators.

Highly automated vehicles from SAE-L4 upwards are likely to behave more cautiously than human drivers, as they have little knowledge of context and informal communication. However, they can also perform manoeuvres that would not normally be possible for a human driver because they react faster, i.e. can largely eliminate the human reaction time known as the "moment of shock." Accident research has also found that many drivers in critical situations do not make full use of their vehicle's deceleration potential, failing to push it to its physical limits even when avoiding an obstacle. Driver assistance systems such as automatic emergency braking assists or avoidance assists are able to compensate for these shortcomings and not only act faster, but also at the physical limits of longitudinal and lateral acceleration. What impact this has on other road users is largely unknown at present [10].

As regards road traffic in Switzerland, an in-depth study [26] by an interdisciplinary group of experts assessed the impact of automated driving on road safety. The study shows that, given the high share of SAE-L1 vehicles, the safety gains from automated driving functions outweigh the associated safety losses (e.g. due to new hazard scenarios; see Figure 3).

This means that a fleet-wide increase in these levels of automation would have a positive overall impact on road safety in Switzerland. However, as the number of SAE-L2 and, in particular, SAE-L3 vehicles increases, the study concludes that safety deficits (due to reduced vigilance, control handover request issues and human-vehicle interaction in general, for example) may significantly outweigh safety gains. As Figure 3 shows, the researchers estimate that the accident rate in Switzerland would increase by just over 30% in a vehicle fleet operating entirely at SAE-L3. The main reason for this increase is the control handover request issue in situations where the automated vehicle system returns the driving task to the hu-

Figure 3: Percentage change in accidents as a function of automation level; solid line = no automation, dashed line = effect of advanced emergency braking systems factored in [26]



man driver within a relatively short period of time. This problem is further exacerbated by the fact that handover moments at SAE-L3 usually involve complex traffic situations, thus placing twofold demands on the driver. To prevent this, the authors recommend installing additional driver assistance systems to monitor the driver's behaviour inside the vehicle.

Only when a high level of automation equivalent to SAE-L4 is achieved, do safety gains outweigh the associated safety deficits compared to current accident levels, e.g. due to mixed traffic or hacking [26]. The assumptions made in the study are more conservative, and Figure 3 shows the safety effects under the assumption that the entire vehicle fleet is operating only at this level of automation. As long as the fleet is predominantly mixed traffic in nature, with a large number of conventional vehicles or vehicles operating at SAE-L2 or -L3, the safety gains are significantly lower, or safety losses must be expected.

3.3 Protection of vulnerable road users

The greater the number of intelligent automated vehicles in the future, the more important it will become to provide situation-specific information and communication that is tailored to the needs and interests of different road user groups. This should take into account not only the needs of vehicle occupants, but also those of non-motorized road users in mixed traffic [27]. It is a fact that pedestrians and cyclists - i.e. particularly vulnerable road users - are often given minor priority in the research landscape [28]. Around a third of traffic routes in Switzerland are travelled on foot, by bicycle or by public transport [29]. The number of pedestrians and cyclists involved in serious road accidents, especially in the very young and older age groups, is disproportionately high compared to their modal share [30]. Future traffic systems are likely to be highly urbanized. It is therefore crucial that the development of automated vehicle systems takes due account of interactions with vulnerable road users such as pedestrians and cyclists – as this text demonstrates.

Automated vehicles should be able to detect unprotected road users and their likely intentions and expected behaviour under all reasonable circumstances and without further action on the unprotected users' part (e.g. reflective clothing). After all, it is not they who have purchased an automated vehicle. It is at least as important that vulnerable road users are able to understand and predict the behaviour of automated or, during the transition phase, semi-automated vehicles. It is already clear today that the impact on other road users – including cyclists and pedestrians [31] – is likely to be significant when automated vehicles operate in urban areas. Vehicle automation will require cyclists and pedestrians to adapt to a changing road traffic system and a different kind of "road user." The adjustment process could be very different for both groups. When introducing different levels of automation on different traffic networks at different points in time, depending on the degree of complexity, interaction with other (non-automated or differently automated) road users is a particularly difficult hurdle to overcome [14]. One resulting side effect is that such mixed-traffic situations demand, for safety reasons, a pronounced and sometimes uncomfortably defensive driving style when interacting with automated vehicles [32].

3.4 Key challenges in communication and interaction

Interaction and communication between different road users are the key factors in mixed-traffic safety considerations. Interactions occur whenever the normal flow of traffic is impeded and usually involve a negotiation over the right of way between at least two road users. While road users generally try to avoid interaction-intensive situations and conflicts, some situations require communication and cooperation to achieve a certain goal [33–36].

The ability of an automated vehicle to respond to both the need for cooperation and the lack of cooperation from other road users is crucial to road safety in mixed traffic. At the same time, industry-standard unambiguous interfaces need to be introduced in automated vehicles. In this context, cooperation should not be understood to mean cooperation between humans and machines within the vehicle, but between automated vehicles and motorized and non-motorized but non-automated road users. In order to operate in a cooperative manner, an automated vehicle must be able to localize itself accurately on the road and within its lane. Additionally, it must be able to automa-

tically sense the stationary and dynamic environment. This automatic sensing in mixed traffic with non-motorized road users, and thus a multitude of potential situations and constellations with different influencing factors, is still a major challenge for vehicle developers [11]. To complicate matters further, there are as yet no legally binding, standardized and harmonized minimum requirements for new signal images for internal and external human-machine interfaces with automated vehicles. Such images would play an important part in ensuring rapid recognition and clear interpretation of signals between automated vehicles and other road users, and in establishing smooth communication and cooperation looking ahead to future developments.

Understanding interactions between vehicles requires a strong basic understanding of the non-verbal aspects of human communication. However, interpretations of non-verbal signals are unreliable and vary according to the traffic situation. Also, the greater the distance between interacting road users, the more likely they are to rely on vehicle-centric cues (e.g. speed reduction). At shorter distances, however, they tend to rely more on driver-centric signals and gestures (e.g. nodding) [37,38].

Road safety in mixed traffic depends on how differently automated and other road users communicate and cooperate with one another. The variability and situation dependency of human behaviour is currently one of the biggest challenges facing automated vehicle decision systems in mixed traffic. It can be assumed that automated vehicles are initially unaware of the multiple and context-dependent significances of communication signals from non-automated road users, and are therefore required to behave relatively conservatively in traffic. Unambiguous communication between all road users is consequently of key importance to road safety in the future. It is essential to define the messages that need to be exchanged in interactions with automated vehicles and other road users, and the signals and information designs that allow intuitive and unambiguous communication between all road users. From today's perspective, it seems almost impossible to program a

standardized interaction situation for automated driving control involving pedestrians and cyclists. This is firstly because of the large individual differences between the choices and behaviour of individual road users, and secondly, because of the high level of dependence on the respective environmental and traffic situation.

According to Deublein (2021) [39], the 10 key challenges as regards the interaction of automated vehicles with other road users in mixed traffic are:

1. unambiguous communication
2. scalability of messages
3. non-standardizable priority rules
4. situational dependency
5. misinterpretation of non-verbal communication
6. unreliable object and hazard detection
7. flawed mental models and expectations
8. behavioural adaptation and lack of situational awareness
9. over-reliance
10. balancing safety and traffic flow

Various challenges may arise in the interaction between road users and machines in increasingly automated mixed traffic. The task now is to achieve consistent, unambiguous and intuitive communication between all road users by means of standardized communication and interaction concepts.

4. Roadmap to safe automated driving

For all the enthusiasm surrounding automated vehicles, the biggest challenge when introducing them is to keep a close eye on safety.

Safety concerns and unambiguous interaction between non-automated road users and automated vehicles in mixed traffic are attracting growing scrutiny from researchers and car manufacturers. It remains to be ascertained how, on the basis of a standardized framework for advancing automated driving, participation in the road traffic of the future can remain at least as safe for all road users as it is today or – as we hope – become even safer as developments progress.

We have summarized the main road safety issues within the context of automated driving in a roadmap. This roadmap can be applied as a kind of a blueprint or compass for coordinated safety management going forward in Switzerland (Figure 4).

The focus topics are arranged along the lines of holistic safety and prevention work. The underlying concept – adapted to the context of automated driving – is the triage established in classical safety work, consisting of the three safety factors humans (vehicle drivers), machines (the vehicles themselves) and the environment (infrastructural and regulatory framework). The focus topics on the outer circle in Figure 4 can be assigned to one single safety factor or a combination of them.

The focus topics were selected on the premise of the following questions: Which of the topics have the greatest relevance to road safety? Which topics contain the biggest scope and leverage for road safety in Switzerland?

The roadmap is intended to serve as a compass that will enable all partners working on prevention, experts, decision makers and stakeholders to keep their bearings in the complex and interdisciplinary topic of automated driving and develop the measures and action strategies that will be most effective in guaranteeing safe road traffic in the future. Following the path set out by this roadmap will be a challenge to all interdisciplinary

participants by demanding the courage and willingness to claim leadership on road safety issues as the basis for legal regulation. Leadership can manifest itself by keeping the topic in the public eye, providing financial support or seeking opportunities to contribute to scientific research.

The individual focus topics are described in the paragraphs below.

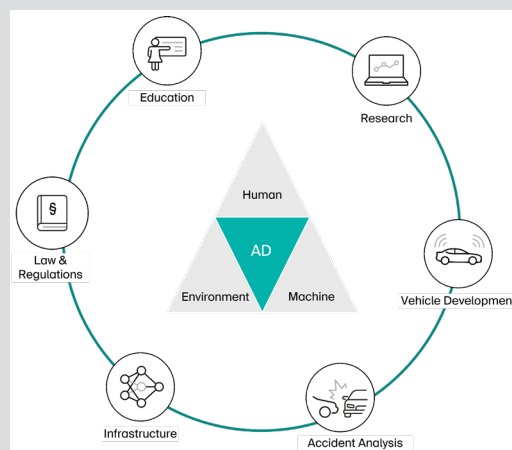


Figure 4: Focus topics of the roadmap to safe automated driving

4.1 Research

This focus topic is primarily concerned with identifying the possible risks associated with automated driving by conducting specific investigations, determining the impact on road safety and developing suitable countermeasures. For example, one area of investigation could be accident occurrence linked to specific vehicle data. In order to increase the scope of empirical research, information on the assistance and automation systems already fitted to each vehicle involved in an accident should be systematically integrated into the FEDRO's central accident database and the standardized police accident recording protocols used in Switzerland. In addition, an open data strategy should be adopted so that research and engineering institutions have straightforward access to these data sources.

Another central task is to summarize the current state of national and international research in such a way that decision-makers and experts can gain a quick and comprehensible picture of the current state of development, future challenges and possible solutions or scope for action.

Current scientific discourse is primarily concerned with technical vehicle solutions. However, adapting traffic infrastructure, educating the public and raising their awareness level are also key to a road-safe future. Human behaviour and communication have a particularly large influence on the interaction between different road users and which is crucial to safety in mixed traffic.

Given that the target situation of a traffic system with a measurable share of automated vehicles does not yet exist, research in the near future will have to rely primarily on surveys, stated preference studies, simulations and experimental manipulations – either in real-world traffic, in bicycle/pedestrian simulators, or in computer-aided or virtual reality studies. The studies available to date have used a variety of methods in different (small-scale) settings, and it is not yet clear to what extent the results of these studies are generalizable.

The current megatrend towards highly automated driving will also benefit the development of the driver assistance systems that already exist today. In the future, vehicles on Swiss roads will be equipped with systems that blur the distinction between comfort and safety-only systems on the one hand and individual driver assistance functions on the other. Road safety will benefit from these advances when it is no longer necessary for drivers to develop their own understanding of the vehicle's assistive or automated functionalities in order to be able to correctly interpret the vehicle's intervention or warnings. Developments should instead move towards a protective zone around the vehicle that supports or reliably replicates the driver's natural behaviour in critical situations. All this must be done by further developing the in-vehicle and external human-machine interface such that warnings and interventions are adapted to human drivers and their environment in a way that avoids misinterpretations and misunderstandings [20]. Despite the extensive potential for increasing automation in road traffic, the human factor is not expected to disappear from traffic systems in short or long term. Traffic will at least be mixed for a long time, and it will remain a challenge for automated vehicles to successfully manage interactions with non-automated road users which are difficult to standardize. The software developers and scientists who design the automation algorithms will have to consider a wide range of human factors. Extensive big data analyses are also required to compare and adapt the behaviour of road users with that of automated vehicles. The frequently

discussed ethical dilemma of how an automated vehicle should respond to an unavoidable collision with a pedestrian or another obstacle is indicative of the real-time operational safety decisions that scientists are being called on to resolve. The authorities have a duty to play an important coordinating role in the adequate design of new automated road systems. In any event, existing knowledge from human factor research must be used to improve road safety while optimizing the outcome between traffic and safety both at the road network and automated vehicle level.

The protection of pedestrian and bicycle traffic in a traffic system involving fully and/or partially automated vehicles requires particular consideration. Several developments are already underway in this regard – notably from a vehicle-centred perspective, but also increasingly from the pedestrian's and cyclist's point of view. The latter is crucial, as the behaviour of pedestrians and cyclists is expected to change as traffic systems become increasingly automated and will thus provide an unsuitable basis for future vehicle programming.

4.2 Vehicle development

The main tasks as regards vehicle development are testing the functionality of existing and new technical developments in advanced driver assistance systems. The biggest challenge in terms of vehicle development is probably communication in mixed traffic. A particular focus area is the human-machine interface – i.e. unambiguous and intuitive communication not only between vehicles with different levels of automation, but also between such vehicles and all other road user groups, especially vulnerable road users, i.e. pedestrians and cyclists. This is an area that requires homogenization and universal specifications in the form of regulations or technical requirements for all types of human-machine interfaces.

Unlike conventional vehicles, automated vehicles will never be a finished product. The ability to wirelessly install upgrades or patches that completely change vehicle behaviour is another innovation in automation with safety implications that should not be underestimated. Experience with software updates shows that several malfunctions are to

be expected in even the most secure systems. A likely next step will therefore be to create dedicated platform environments that safely handle automated vehicles and test calibrations of vehicles before they are released under administrator supervision. At the same time, there is a need for complete traceability of software updates sent to any vehicle at a given point in time. Recent approaches in blockchain technology could be one way of achieving this. The surrogate metrics [40] that could potentially be obtained from systematized data collection and analysis could also help deliver significant safety gains in networked and automated systems.

4.3 Accident analysis

This focus topic entails requesting and evaluating specific event and vehicle data. Important questions that urgently need to be addressed are:

- Who was responsible for the driving task at the time the accident occurred – the vehicle or the driver?
- Which systems should be mandatory in automated vehicles going forward? Just an Event Data Recorder (EDR)? Or also a Data Storage System for Automated Driving (DSSAD)?
- By whom and in what format should vehicle data be requested in the event of an accident?
- How can such data be systematically evaluated not only to reconstruct individual accidents, but also to prevent accidents by using the data in meta-analyses?

Data protection issues are always present in any discussion of vehicle data analysis. The challenge here is to make a clean distinction between purely personal data, which must remain private, and aggregated data that cannot be traced back to individuals.

Hedlund (2017) [41] recommends that police officers attending an accident should have some way of establishing the vehicle status (e.g. SAE automation level). It should be possible at any given time to determine whether the dynamic driving task was the responsibility of the vehicle or the driver or whether a request had been issued for the driver to take over the driving task. There must

also be a guarantee that automated driving functions cannot be activated outside their defined operating range. Another report provides similar guidance and adds that the authorities need to know how the driving mode was selected, i.e. by the driver or by a default setting. For this reason, some form of visual identification (e.g. a visual signal) is proposed to indicate that an automated vehicle is operating in automated mode [42]. A research group in Switzerland came to very similar conclusions and recommends securing and managing relevant vehicle data through a central, official and fiduciary administration body [43]. This is the only way to reconstruct the role of humans in automated driving at any given time and to gain valuable insights for future developments and licensing requirements.

4.4 Infrastructure

The aim of this focus topic is to examine the adaptation needs of analogue and digital infrastructure.

The issue as regards analogue infrastructure is whether to optimize existing infrastructure, with its current signalling features, so that the sensors of automated vehicles can detect them seamlessly. This would support or replace human perception. Alternatively, should the infrastructure of the future be based mainly on digital communication resources such as real time digital roadmaps? If so, what is the potential safety impact not only of interconnecting vehicles via V2V (vehicle-to-vehicle) but also of connecting vehicles to the infrastructure via V2X (vehicle-to-everything)? What safety benefits could vulnerable non-digital road users derive from V2X? At present it is clear that network operators are still largely unprepared and the need to think about strategies and appropriate approaches to future infrastructure investments has not yet been fully recognized.

4.5 Law and regulations

The current development dynamic is driven primarily by the car manufacturers themselves. New models and updated vehicle types featuring new and ever more extensive automation functions are being launched in rapid succession. Policymakers and legislators are struggling to keep up and to define an appropriate regulatory framework. However, it is the responsibility of government and science to anticipate and steer technological development as proactively as possible towards socially desirable goals.

Endeavours to ensure or even improve the safety of road users and the public must focus on mixed traffic – and thus the interface between human and machine – even as technology advances. Only then can technological progress generate additional social value and improve quality of life.

It is important that automated vehicles in public road traffic are required from the outset to meet at least the same high safety and reliability standards as vehicles operating in current conventional road traffic. It is also clear, however, that no system can ever be considered 100% safe, in which case the key question is: “How safe is safe enough?” There is as yet no legally enshrined answer to this question. A clear answer will be necessary, however, in order to impose appropriate legal requirements on vehicle manufacturers and define a regulatory framework for automated vehicles in road traffic. Defining the necessary safety levels is also crucial to social acceptance. At present, the expectation is that automated driving will only gain public acceptance if it achieves a considerably higher safety standard than the average human driving in current conventional road traffic. When defining minimum safety standards, however, there is a need to consider that overly conservative requirements and demands for a next-to-infallible system may at the same time prevent public acceptance and the potential safety effect [44].

The focus topic of law and regulations includes the important task of defining safety-oriented requirements and test procedures for vehicle approval and legislation. One of the crucial points here is that the Swiss road traffic act is currently undergoing revision. As part of this process, key aspects of automated driving are being incorporated into the law and the responsibilities of the Federal Council and Parliament are being defined. The challenge is to develop sufficiently safe and at the same time development-friendly guidelines for the country and its social requirements.

Ultimately, public acceptance seems to be the most critical parameter in establishing automated vehicles. This will require continuous trust building. To be successful, the road safety performance of automated driving must be better than

the current state of conventional driving. Public acceptance will increase market share and thus investment in the development of automated vehicles. This means higher investment in safety technology, infrastructure adaptation and road user education. Road safety is the first step towards creating this positive circle of acceptance and technological development. In this context, the question “How safe is safe enough?” still needs to be answered, both internationally and from a Swiss perspective. This question could also be an important potential “show stopper”: automated vehicles have to be safe enough to generate sufficient public trust to increase their market and fleet share.

The European Commission (2018) recommends [45] that national enforcement authorities, in cooperation with road transport authorities, should increase their readiness for the introduction of automated vehicles in order to ensure a safe transition from conventional to automated driving. This includes training staff to handle cases involving automated vehicles with sufficient expertise, since this is the only way that authorities could determine liability claims or offences.

4.6 Education

In our current traffic system, interactions between road users – including those between motor vehicles and pedestrians and cyclists – are primarily based on formal rules and regulations. However, correct application of these rules is subject to a large number of conscious or unconscious behavioural processes. These processes relate to personal traits such as skills and experience, knowledge, motivation, state of mind, age and gender. Additionally, expectations, the presence and behaviour of other pedestrians or cyclists, and feelings of safety or insecurity influence the behaviour of other pedestrians or cyclists. Communication between road users – usually non-verbal communication such as nodding or hand gestures – helps to make their intentions clear, either to support the formal rules or to make an informal suggestion where warranted.

The focus topic of education includes not only new concepts of driving training, but also raising social awareness of the new challenges posed by automated driving. Sooner or later, the classic driving school concept will probably no longer exist. So what skills, competences and driving aptitudes will users still need or have to acquire in the future?

Two aspects of this focus topic are crucial to road safety in the context of automated driving:

- Exploiting the safety potential of driver assistance systems: This means implementing theoretical knowledge and hand-on training in using driver assistance systems.
- Avoiding new accident patterns from selfdriving vehicles in higher SAE levels: Users must be made aware of the functionalities, and – above all – the critical system limitations so that they can avoid over-confidence and misuse.

A growing number of driver assistance systems and automated driving functions are changing the driver's role of performing the dynamic driving task. Future generations of motorists may lack the experience of interpersonal communication in mixed traffic. Moreover, as cars with different levels of automation will be on the roads at the same time in the not too distant future, the way in which vehicle drivers communicate will change too. The need for new approaches to communication in mixed traffic and the question of whether this will lead to new communication strategies and rules must be an integral part of future research, and then of a consistent approach to teaching the necessary skills to all road users. For the safest possible interaction in mixed traffic, it is vitally important that all road users be familiar with the range of functions and functional limitations of vehicles with varying levels of automation. When activated, automated driving systems have a direct impact on vehicle control, i.e. the driver is not involved. Drivers therefore need additional knowledge about the range of functions, system status, system target and system limitations in order to be able to guide their vehicle safely through mixed traffic. Most importantly, drivers must correctly recognize the system limitations and their respective significance at all times, e.g. in order to appropriately respond to a handover request from the system. We recommend teaching this knowledge of system limitations and the interactions between the individual systems both in theory and in practice regardless of driving experience.

4.7 Conclusions

Ever since the early days of automobility as a socially established means of transport, the subject of automated driving has served as the screen onto which many visions have been projected. Now, the vision of automated driving is slowly but steadily becoming a reality. With this in mind, ensuring road safety is the driving force behind all considerations regarding the licensing requirements of automated vehicles, the legal framework and suitable next steps for automated driving in Switzerland. Only if we are able to completely understand the effects of automated driving on road safety we will be able to regulate the standards, limitations, critical safety targets and operational design domains for such vehicles. It is of utmost importance to move from the vision of automated driving to concrete fields of action in terms of prevention and road safety work. The time has come to initiate activities, set focal points and stimulate discourse to actively participate in shaping the development path of safe automated driving in Switzerland.

The roadmap is intended to serve as a compass that will enable all partners working on prevention, experts, decision makers and stakeholders to keep their bearings in the complex and interdisciplinary topic of automated driving and develop measures and action strategies that are as effective as possible. We will all have to keep adjusting the compass over the years ahead in order to address whatever research issues are topical at the time.

In conclusion, one of the biggest challenges in the introduction of automated vehicles will probably also be to not lose sight of safety despite all the enthusiasm [45].

References

- [1] Beratungsstelle für Unfallverhütung BFU. Unfallursachen im Strassenverkehr: Medienmitteilung vom 25.07.2019. Beratungsstelle für Unfallverhütung BFU, Hg; 2019.
- [2] Tingvall C, Haworth N. Vision Zero – An ethical approach to safety and mobility. Conference Proceedings [6th ITE International Conference Road Safety & Traffic Enforcement: Beyond 2000]. 1999.
- [3] Whitelegg J, Haq G. Vision Zero: Adopting a Target of Zero for Road Traffic Fatalities and Serious Injuries. Stockholm: Stockholm Environment Institute; 2006.
- [4] Bundesamt für Strassen ASTRA. Evaluation von Via sicura: Technischer Bericht; 2017.
- [5] Larsson P, Tingvall C, Hg. The Safe System Approach – A Road Safety Strategy Based on Human Factors Principles: Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics. Applications and Services: Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2013.
- [6] Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. GDV. Erhöht automatisiertes Fahren die Sicherheit? 2018.
- [7] Zeippen I. POLIS - Discussion Paper Automated Vehicles; 2018.
- [8] KiM Institute for Transport Policy Analysis. Paths to a self-driving future. 2017.
- [9] Lemmer K. Neue autoMobilität: Automatisierter Strassenverkehr der Zukunft [Acatech Studie]. München: Herbert Utz Verlag; 2016.
- [10] Maurer M, Gerdes JC, Lenz B, Winner H, Hg. Autonomes Fahren: Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte. Berlin: Springer; Springer Berlin Heidelberg; 2015.
- [11] Gasser T, Schmidt E, et al. Bericht zum Forschungsbedarf: Runder Tisch automatisiertes Fahren – AG Forschung: Deutsches Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, BMVI; 2015.
- [12] Eckstein L, Zlocki A, Dittmar T, Woopen T. Automatisiertes Fahren - Potenziale, Herausforderungen und Lösungsansätze: 120 Jahre ATZ Jubiläumsausgabe. ATZ. 2018: 58–63.
- [13] Rösener C, Sauerbier J, Zlocki A et al. Potenzieller gesellschaftlicher Nutzen durch zunehmende Fahrzeugautomatisierung. Bremen: Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH; 2019. Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen BASt, Fahrzeugtechnik F 128.
- [14] Klein TA. Autonomes Fahren - steuern oder überrollt werden? Strassenverkehrstechnik. 2019;(3).
- [15] ERTRAC. Connected Automated Driving Roadmap 2019 [Version 8]. 2019.
- [16] Dubbert J, Müller B, Meyer G, et al., Hg. Roadmap for Accelerated Innovation in Level 4/5 Connected and Automated Driving: Advanced Microsystems for Automotive Applications 2018: Cham: Springer International Publishing; 2019.
- [17] EBP Schweiz AG. Einsatz automatisierter Fahrzeuge im Alltag: Denkbare Anwendungen und Effekte in der Schweiz [Synthesebericht]. Zürich: EBP Schweiz AG; 2018.
- [18] Amditis A. The EU project interACT: Designing cooperative interaction of automated vehicles with other traffic participants. TRB Conference; January 2019; Washington DC.
- [19] FERSI FoERSRI. Safety through automation?: Ensuring that automated and connected driving contribute to a safer transportation system [FERSI Position Paper - January 19, 2018]; 2018.
- [20] Winner H, Hakuli S, Lotz F, Singer C, Hg. Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort. 3., überarb. und erg. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg; 2015. ATZ/MTZ-Fachbuch.
- [21] Rizzi M, Kullgren A, Tingvall C. Injury Crash Reduction of low-speed Autonomous Emergency Braking (AEB) on Passenger Cars: Proceedings of the IRCOBI Conference 2014; 2014.
- [22] European Road Safety Observatory ERSO. Advanced driver assistance systems: European Road Safety Observatory ERSO; 2018.
- [23] Carsten O, Tate FN. Intelligent speed adaptation: Accident savings and cost-benefit analysis. *Accid Anal Prev.* 2005; 37(3): 407–416. DOI:10.1016/j.aap.2004.02.007.
- [24] Eriksson A, Stanton NA. Takeover Time in Highly Automated Vehicles: Noncritical Transitions to and From Manual Control. *Hum Factors.* 2017; 59(4): 689–705. DOI:10.1177/0018720816685832.
- [25] Banks VA, Eriksson A, O'Donoghue J, Stanton NA. Is partially automated driving a bad idea? Observations from an on-road study. *Appl Ergon.* 2018; 68: 138–145. DOI:10.1016/j.apergo.2017.11.010.
- [26] EBP Schweiz AG. Automatisiertes Fahren: Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit in der Schweiz [Schlussbericht vom 31. Mai 2018]; 2019.
- [27] Fastenmeier W, Risser R. Ergonomische Ansätze der Verkehrspsychologie: Verkehrspsychologische Grundlagen für die menschengerechte Verkehrsraum- und Fahrzeuggestaltung. DGVP Newsletter [Infos-Positionen-Empfehlungen]. 2020;(08).
- [28] van Nes CN, Duivenvoorden C. Safely towards self-driving vehicles: new opportunities new risks and new challenges during the automation of the traffic system: Institute for Road Safety Research SWOV; 2017.
- [29] Bundesamt für Statistik BFS, Bundesamt für Raumentwicklung ARE. Verkehrsverhalten der Bevölkerung: Ergebnisse des Mikrozensus Mobilität und Verkehr 2015. Neuenburg; 2017. Mobilität und Verkehr 11.
- [30] Beratungsstelle für Unfallverhütung BFU. Sinus 2019: Sicherheitsniveau und Unfallgeschehen im Strassenverkehr 2018. Bern: BFU; 2019. DOI:10.13100/BFU.2.362.01.
- [31] Luuk Vissers, Sander van der Kint, Ingrid van Schagen, Marjan P Hagenzieker. Safe interaction between cyclists, pedestrians and automated vehicles. What do we know and what do we need to know?; 2017. DOI:10.13140/RG.2.2.23988.86408.
- [32] Coppola G. Can Neuroscience Teach Robot Cars to Be Less Annoying?: Perceptive Automata wants to give automated vehicles human-like intuition on the road.: Perceptive Automata wants to give automated vehicles human-like intuition on the road. [Zeitungsmeldung]. Bloomberg online; 09.10.2018. www.bloomberg.com/news/articles/2018-10-09/can-neuroscience-teach-robot-cars-to-be-less-annoying.
- [33] Schlag B. Automatisiertes Fahren im Strassenverkehr – Offene Fragen aus Sicht der Psychologie. *ZVS.* 2016;(2): 94–98.
- [34] Dietrich A, Bengler K, Evangelia P et al. Designing cooperative interaction of automated vehicles with other road users in mixed traffic environments: interACT D.2.1: EU; 2018.
- [35] Bundesanstalt für Strassenwesen BASt. Grundlagen zur Kommunikation zwischen automatisierten Kraftfahrzeugen und Verkehrsteilnehmern: Forschungsprojekt 82.701 (laufend). Bundesanstalt für Strassenwesen BASt, Hg; 2019. https://www.bast.de/BASt_2017/DE/Projekte/laufende/fp-laufend-f4.html.
- [36] Bazilinskyy P, Dodou D, de Winter J. Survey on eHMI concepts: The effect of text, color, and perspective; 2019.

[37] Meyer G, Beiker S. Road Vehicle Automation 5 [Based on the contributions at Automated Vehicle Symposium 2017]: Springer International Publishing; 2019. Lecture Notes in Mobility.

[38] Habibovic A, Andersson J, Lundgren VM et al. External Vehicle Interfaces for Communication with other Road Users?; 2018. Road Vehicle Automation 5.

[39] Deublein M. Automated driving: Mixed traffic. Berne: Swiss Council for Accident Prevention BFU; 2021.

[40] Santacreu A. New directions for Data-Driven Transport Safety [Cooperate Partnership Board Report]. Paris: International Transport Forum ITF; 2019.

[41] Hedlund J, Hg. Autonomous Vehicles Meet Human Drivers: Traffic Safety Issues for States. Transportation Research Board, 96th annual meeting: Washington, D.C; USA; 2017.

[42] Cunningham ML, Regan MA. Driver distraction and inattention in the realm of automated driving. *Intell Transp Sy.* 2018; 12(6): 407-413(6).

[43] Gross J, Muser M, Florin G et al. Unfallanalyse der Zukunft: Bundesamt für Strassen ASTRA; 2019.

[44] Winkle T. Safety Benefits of Automated Vehicles: Extended Findings from Accident Research for Development, Validation and Testing. In: Maurer M, Gerdes JC, Lenz B, Winner H, Hg. *Autonomous Driving: Technical, Legal and Social Aspects.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2016: 335–364. DOI:10.1007/978-3-662-48847-8_17.

[45] European Commission. *Autonomous Vehicles & Road Safety.* Brussels: Directorate General for Transport; 2018.

[46] Altenburg S. Einführung von Automatisierungsfunktionen in der Pkw-Flotte: ADAC; 2018.

Imprint

Author

Markus Deublein, Research Associate, BFU

Project team

Ladina Barbadimos, University internship, Research, BFU

Andrea Krämer, Proofreader, Publications Dept. / Language Services BFU

Jasmin Zimmermann, Research Associate, BFU

Image references

Page 3: [15,17,46]

Page 5: author's own representation based on [18]

Page 6: [26]

Page 10: author's own representation

Slight differences in table totals are possible due to rounding up/down.

We trust this will not cause our readers any inconvenience.

Impressum

Autor:innen

Executive Summary & Aufriss: Wolfgang Kröger

Vertiefende Einzelbeiträge: Ali Ayoub, Jan Steffen Becker, Eckard Böde, Biagio Ciuffo, Werner Damm, Markus Deublein, Ulrich Eberle, Miriam Elser, Markus Erne, Hauke Fehlberg, Maria Cristina Galassi, Armin Grunwald, Sven Hallerbach, Christian Hohl, Meike Jipp, Frank Koester, Tjark Koopmann, Birte Kramer, Thomas Küchler, Antony Lagrange, Karsten Lemmer, Dejan Milojevic, Christian Neurohr, Marius Schmidt, Mohamad Louai Shehab, Michael Sutter, Lukas Westhofen, Boris Wirtz, Marco Zanella

Konzept: Wolfgang Kröger, Stefan Scheidegger

Projektleitung: Stefan Scheidegger

Redaktion: Esther Lombardini, Christian Holzner, Stefan Scheidegger

Review: Tony Kaiser

Gestaltung und Illustration: André Sandmann, Jaden Fischer, Romy Breiter (Pikka)

Druck: Staffel Medien AG

DOI: 10.5281/zenodo.5907154

Februar 2022

