



Fachbereich WD 5

Technische Aspekte des Autonomen Fahrens

Technische Aspekte des Autonomen Fahrens

Aktenzeichen: WD 5 - 3000 - 039/26
Abschluss der Arbeit: 28.05.2026
Fachbereich: WD 5: Wirtschaft, Energie und Klima

Die Wissenschaftlichen Dienste des Deutschen Bundestages unterstützen die Mitglieder des Deutschen Bundestages bei ihrer mandatsbezogenen Tätigkeit. Ihre Arbeiten geben nicht die Auffassung des Deutschen Bundestages, eines seiner Organe oder der Bundestagsverwaltung wieder. Vielmehr liegen sie in der fachlichen Verantwortung der Verfasserinnen und Verfasser sowie der Fachbereichsleitung. Arbeiten der Wissenschaftlichen Dienste geben nur den zum Zeitpunkt der Erstellung des Textes aktuellen Stand wieder und stellen eine individuelle Auftragsarbeit für einen Abgeordneten des Bundestages dar. Die Arbeiten können der Geheimschutzordnung des Bundestages unterliegende, geschützte oder andere nicht zur Veröffentlichung geeignete Informationen enthalten. Eine beabsichtigte Weitergabe oder Veröffentlichung ist vorab dem jeweiligen Fachbereich anzuzeigen und nur mit Angabe der Quelle zulässig. Der Fachbereich berät über die dabei zu berücksichtigenden Fragen.

Inhaltsverzeichnis

1.	Kontext dieser Arbeit	4
2.	Klassifizierung automatisierter Fahrzeuge	4
3.	Technischer Hintergrund	5
3.1.	Sensortechnik	6
3.1.1.	Ultraschall	7
3.1.2.	Radio Detection and Ranging – Radar	7
3.1.3.	Light Detection and Ranging – Lidar	8
3.1.4.	Kamerasysteme	8
3.2.	Software	9
4.	Technische Herausforderungen	10
4.1.	Allgemeine Einschätzung	10
4.2.	Einzelherausforderungen	11
4.3.	Corner Cases	11
4.4.	Sensorik	12
4.5.	Infrastruktur	13
5.	Betriebsmodelle	14
5.1.	Ownership	15
5.2.	Sharing	15
5.3.	Logistics	16

1. Kontext dieser Arbeit

Der vorliegende Sachstand beschäftigt sich mit den technischen Voraussetzungen und den damit verbundenen Herausforderungen des automatisierten bzw. autonomen Fahrens. Unterschiede zwischen verschiedenen Betriebsmodellen werden ebenfalls angerissen.

Regulatorische und wirtschaftliche Aspekte des automatisierten bzw. autonomen Fahrens werden in weiteren Arbeiten der Wissenschaftlichen Dienste dargelegt.¹

2. Klassifizierung automatisierter Fahrzeuge

Automatisierte und autonome Fahrzeuge können entsprechend ihres Automatisierungsgrades klassifiziert werden. International üblich ist die Einteilung nach der Norm SAE J3016² in sechs Stufen/SAE-Level. Das Fraunhofer-Institut für Experimentelles Software Engineering (IESE) fasst auf seiner Homepage zu autonomem Fahren³ die einzelnen Stufen wie in Tabelle 1 dargestellt zusammen.

Tabelle 1: International übliche Einteilung von Fahrzeugen entsprechend ihres Automatisierungsgrads.⁴

Stufe/SAE-Level	Beschreibung	Beispiel
Stufe 0: keine Automatisierung	Alle Fahrfunktionen werden vom Menschen ausgelöst und kontrolliert.	
Stufe 1: Assistiertes Fahren oder Parken	Beschleunigungs- und Bremsfunktionen können vom Fahrzeug unterstützt werden.	Tempomat
Stufe 2: Teilautomatisiertes Fahren oder Parken	Gas, Bremse und Lenkfunktion können vom Fahrzeug unterstützt werden. Der Fahrer muss das Auto fortlaufend überwachen und jederzeit in der Lage sein, die Kontrolle zu übernehmen.	Einpark-Assistent
Stufe 3: Hochautomatisiertes Fahren oder Parken	Das Fahrzeug kann in bestimmten Situationen die Fahraufgabe vollständig übernehmen. Der Fahrer muss nach einer Aufforderung die Kontrolle in einer	Automatische Kolonnenfahrt bei Autobahn-Staus

1 Wissenschaftliche Dienste (2026): Autonomes Fahren – Rechtslage und Markteinführung in Deutschland, WD 5 – 3000 – 038/26 und Wissenschaftliche Dienste (2026): Wirtschaftliche Herausforderungen bei der Markteinführung Autonomer Fahrzeuge, WD 5 – 3000 – 040/26.

2 SAE International (2021): Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles, https://doi.org/10.4271/J3016_202104.

3 Fraunhofer-Institut für Experimentelles Software Engineering (IESE): Autonomes Fahren, <https://www.iese.fraunhofer.de/de/trend/autonomes-fahren.html>.

4 Alle Inhalte dieser Tabelle sind direkt entnommen aus: ebd.

Stufe/SAE-Level	Beschreibung	Beispiel
	definierten Zeit (i.d.R. wenige Sekunden) wieder übernehmen.	
Stufe 4: Teilautonomes Fahren oder Parken	Das Fahrzeug kann in bestimmten Situationen die Fahraufgabe vollständig übernehmen. Das Fahrzeug kann sich jederzeit selbstständig in einen „sicheren Zustand“ begeben, wie z.B. Anhalten am Straßenrand – ein Eingreifen durch einen Fahrer ist also nicht mehr erforderlich, um die Sicherheit zu gewährleisten.	Automatische Autobahnfahrt
Stufe 5: Vollautonomes Fahren oder Parken	Das Fahrzeug kann eine Fahraufgabe vollständig übernehmen. Ein Fahrer ist nicht notwendig.	Taxifahrt von zuhause zum Bahnhof, „Roboter-Taxi“ ⁵

Ausführlicher erklärt werden die Automatisierungsstufen z. B. vom Kraftfahrtbundesamt.⁶ Edwin Kamau von der Technischen Hochschule Köln weist darauf hin, dass sich tatsächlich verbaute Systeme nicht immer eindeutig einzelnen Stufen zuordnen lassen.⁷

3. Technischer Hintergrund

Das Fraunhofer-Institut für Experimentelles Software Engineering (IESE) beschreibt die Aufgaben eines automatisierten bzw. autonomen Fahrzeugs wie folgt:

„Beim automatisierten Fahren muss die Technik die Fahraufgaben eines Menschen übernehmen. Dies geschieht durch Elektronik und Software. Sensoren sind dabei die Augen und Ohren des Fahrzeugs. Motoren und Ventile die Aktoren z.B. für Lenkvorgänge oder das Bremsen. Koordiniert und gesteuert wird alles über leistungsfähige Steuergeräte, d.h. Microcontroller und Computer im Fahrzeug, welche über Datennetze miteinander verbunden sind.“⁸

5 Roboter-Taxis, die sich nur in bestimmten Einsatzbereichen bewegen (z. B. im Innenstadtbereich einer Großstadt) und einer Technischen (Fern-) Aufsicht unterliegen, entsprechen SAE-Stufe 4. Fahrzeuge mit SAE-Stufe 5 können sich ohne Aufsicht uneingeschränkt bewegen. Mehr zur Technischen Aufsicht findet sich in Wissenschaftliche Dienste (2026): Autonomes Fahren – Rechtslage und Markteinführung in Deutschland, WD 5 – 3000 – 038/26.

6 Kraftfahrtbundesamt: Automatisierungsstufen, https://www.kba.de/DE/Themen/Marktueberwachung/Produktpruefungen/Pruefinhalte/AutomatisiertesAutonomesFahren/Automatisierungsstufen/Automatisierungsstufen_node.html.

7 Technische Hochschule Köln (2023): Autonomes Fahren: Fortschritte und Herausforderungen im Fokus, https://www.th-koeln.de/hochschule/autonomes-fahren-fortschritte-und-herausforderungen-im-fokus_106018.php.

8 Fraunhofer-Institut für Experimentelles Software Engineering (IESE): Autonomes Fahren, <https://www.iese.fraunhofer.de/de/trend/autonomes-fahren.html>.

Das lässt sich auf folgende Kernaufgaben herunterbrechen:

- Generieren von Messdaten, Sensorik: Messdaten aus verschiedenen Sensoren (Kamera, Lidar, Radar) müssen kombiniert und plausibilisiert werden, auch bei schlechtem Wetter oder ausgefallenen Sensoren.
- Echtzeit-Datenverarbeitung: Die Messdaten müssen in Echtzeit interpretiert werden. Die erforderliche Rechenleistung darf nicht zu übermäßigem Stromverbrauch führen.
- Situationserkennung und Entscheidungsfindung: KI-Systeme müssen auch komplexe Verkehrssituationen korrekt und ohne menschliche Validierung erkennen. Es ist dabei nicht möglich, alle möglichen Verkehrssituationen im Vorfeld zu testen.
- Reaktionsfähigkeit: Das System muss in Echtzeit reagieren.
- Sicherheit: Das System sollte keine sicherheitskritischen Fehler machen und vor Hackerangriffen geschützt sein.

Die folgenden Abschnitte gehen auf die dafür notwendige Sensortechnik und Software näher ein.

3.1. Sensortechnik

Die Fachzeitschrift *automotiveIT* stellt auf ihrer Homepage verschiedene Aspekte des autonomen Fahrens dar, u. a. auch die notwendigen Sensortypen. Fuchslochner erläutert die Notwendigkeit, verschiedene Sensortypen zu kombinieren (Sensorfusion):

„Keine einzelne Sensortechnologie reicht aus, um automatisiertes Fahren ab Level 3 zuverlässig zu ermöglichen. Erst die Fusion verschiedener Sensortypen – von Kamera und Radar über Lidar bis hin zu Ultraschall – liefert ein konsistentes Bild der Fahrzeugumgebung.“⁹

Large et al. gehen näher auf die Gründe für die notwendige Fusion verschiedener Sensortypen ein:

„Hauptgrund für den redundanten Aufbau der Sensorsysteme sind deren individuelle Schwächen. Lidar ist als optischer Sensor ebenso anfällig für ein blockiertes Sichtfeld wie Kameras, beispielsweise durch Nebel oder starken Niederschlag, und benötigt hohe Kapazitäten zur Datenverarbeitung. Im Unterschied zu Kamerasystemen sind Lidar-Sensoren zudem nur in der Lage, Objekte hinsichtlich ihrer Form, Entfernung und Bewegung zu erfassen, was unter anderem die automatische Erkennung von Verkehrsschildern unmöglich macht.

9 Fuchslocher (2025): Welche Sensoren benötigen autonome Autos?, *automotiveIT*, <https://www.automotiveit.eu/autonomes-fahren/welche-sensoren-benoetigen-autonome-autos/921673>.

Radar-Systeme sind zwar weniger anfällig für schlechte Sichtverhältnisse, der Wirkungsgrad ist jedoch stark vom Absorptionsfaktor der reflektierenden Oberfläche abhängig.“¹⁰

Die Funktion und der Einsatzbereich der genannten Sensortypen werden im Folgenden weiter erklärt.

3.1.1. Ultraschall

Ultraschallsensoren beurteilen „die Laufzeit ausgesendeter Schallimpulse zum reflektierenden Objekt. Die Technik deckt einen knapp bemessenen Kurzbereich ab.“¹¹ Fuchslochner erläutert:

„Ultraschallsensoren gehören seit den frühen 1990er-Jahren zur Standardausstattung moderner Fahrzeuge – eingeführt 1991 im BMW 7er, inzwischen millionenfach verbaut. Ursprünglich vor allem als Einparkhilfe bekannt, hat sich die Technologie zu einer verlässlichen Kurzstrecken-Sensorik entwickelt, die auch bei widrigen Sichtverhältnissen zuverlässig arbeitet. Ihre Stärken liegen in geringen Kosten, robuster Bauweise und hoher Marktdurchdringung. [...]

Im strategischen Kontext autonomer Fahrzeuge bleibt Ultraschall damit eine Schlüsselsensorik für den Nahbereich, insbesondere im Bereich Automated Valet Parking (AVP)¹², das aktuell von Herstellern wie Mercedes-Benz, BMW und Zulieferern wie Bosch vorangetrieben wird. Während Radar, Kamera und Lidar in höheren Geschwindigkeitsbereichen dominieren, sorgt Ultraschall für die präzise Umfeldwahrnehmung im unmittelbaren Fahrzeugumfeld und sichert damit die letzte Lücke auf dem Weg zum hoch- und vollautomatisierten Fahren.“¹³

3.1.2. Radio Detection and Ranging – Radar

Beim Radar wird das Echo elektromagnetischer Funkwellen ausgewertet. Fuchslochner erläutert:

„[Radar-Systeme] eignen sich zur Messung von unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Entfernungen. Weniger tauglich galten sie bislang für die Klassifizierung von Objekten. Radar

10 Large et al. (2025): Wie funktioniert ein Lidar-Sensor im Auto?, automotiveIT, <https://www.automotiveit.eu/autonomes-fahren/wie-funktioniert-ein-lidarsensor-im-auto/923294>.

11 Fuchslocher (2025): Welche Sensoren benötigen autonome Autos?, automotiveIT, <https://www.automotiveit.eu/autonomes-fahren/welche-sensoren-benoetigen-autonome-autos/921673>.

12 Gemeint ist hier eine fahrerlose Parkfunktion: „Automated Valet Parking beschreibt eine Funktion für das fahrerlose Fahren und Parken eines AVP-Fahrzeuges innerhalb des AVP-Anwendungsbereiches. Dies ermöglicht das fahrerlose Bewegen des AVP-Fahrzeuges von einem definierten sicheren Übergabe- bzw. Annahmestandort zu einem durch das System vorgegebenen Parkplatz.“, vgl. Kraftfahrtbundesamt (2022): Technischer Anforderungskatalog für die autonome Fahrfunktion „Automated Valet Parking (AVP)“, https://www.kba.de/DE/Themen/Typgenehmigung/Zum_Herunterladen/autonomes_automatisiertes_Fahren/dl_anforderungskatalog_AVP.html.

13 Fuchslocher (2025): Welche Sensoren benötigen autonome Autos?, automotiveIT, <https://www.automotiveit.eu/autonomes-fahren/welche-sensoren-benoetigen-autonome-autos/921673>.

bietet von Haus aus gute Möglichkeiten, um den Abstand zu einem vorausfahrenden Fahrzeug zu ermitteln, etwa für die automatische Notbremsfunktion. [...]

Neue Entwicklungen beim Radar könnten der Technologie im Reigen der Sensorik-Typen zu erheblichem Aufwind verhelfen. So kann 4D Imaging Radar mittlerweile die Umgebung detailliert erfassen, indem es Objekte detektiert, separiert und anschließend klassifiziert. [...] Im Vergleich zur laserbasierten Alternative gelten [Radar-Systeme] als kostengünstiger sowie robuster bei schlechten Licht- und Wetterverhältnissen.“¹⁴

3.1.3. Light Detection and Ranging – Lidar

Fuchslochner erläutert zu Lidar:

„Light Detection and Ranging (Lidar) gilt heute als Schlüsselsensor für die hochauflösende Umfelderkennung. Mit der Fähigkeit, präzise 3D-Informationen in Echtzeit zu erzeugen, ist Lidar in vielen Level-3- und Level-4-Szenarien unverzichtbar. [...]

Derzeit stehen zwei Verfahren im Zentrum der Entwicklung: Time of Flight (ToF) und Frequency-Modulated Continuous Wave (FMCW). [...] [ToF-] Technologie ist seit Jahren in Serienfahrzeugen etabliert, etwa im Mercedes EQS (Valeo Scala 2) oder bei Modellen asiatischer Hersteller wie XPeng und Nio. Ihre Schwäche liegt in der begrenzten Reichweite, da die Intensität des Laserlichts aus Gründen der Augensicherheit nicht beliebig erhöht werden darf.

[...] Der Vorteil [von FMCW]: Neben der Entfernung lässt sich auch die Geschwindigkeit von Objekten direkt messen, und die Technik gilt als robuster bei Sonnenlicht oder Nebel. [...] [Allerdings] steckt FMCW noch in den Kinderschuhen – die Technologie ist komplex, teuer und stellt hohe Anforderungen an die Laserquelle.“¹⁵

3.1.4. Kamerasysteme

Zu Kamerasystemen erläutert Fuchslochner:

„Kameras sind die am weitesten verbreitete Sensortechnologie im Fahrzeug und bilden in allen Fahrassistenzsystemen die Basis für die Umfelderkennung. Mit ihren hohen Auflösungen erfassen sie Objekte präzise und können diese mithilfe künstlicher Intelligenz nicht nur erkennen, sondern auch interpretieren. Damit rücken sie in Richtung eines Szenenverständnisses, das weit über die reine Objektdetektion hinausgeht – etwa wenn ein System antizipiert, dass ein Fußgänger im Begriff ist, die Fahrbahn zu betreten.

Herausforderungen wie Verschmutzung, Blendung oder Dunkelheit bleiben, doch die Industrie begegnet ihnen mit technischen Lösungen: Linsenheizungen, Reinigungsdüsen,

14 Ebd.

15 Ebd.

hydrophobe Beschichtungen und KI-gestützte Bildverbesserung sichern die Funktionsfähigkeit auch bei widrigen Bedingungen. [...]

Kameras bleiben aufgrund ihrer geringen Kosten und hohen Verfügbarkeit ein zentraler Sensor, entfalten ihr volles Potenzial im autonomen Fahren jedoch erst im Zusammenspiel mit Radar, Lidar und Cloud-Daten.“¹⁶

3.2. Software

„Die Herausforderung liegt [beim autonomen Fahren] nicht nur in der Sensorik selbst, sondern in der Rechenarchitektur.“¹⁷ Das IESE skizziert die Anforderungen an die Rechentechnik in automatisierten Fahrzeugen wie folgt:

„Die Interpretation von Kamera- oder Radarbildern zur Umfelderkennung ist eine komplexe und rechenintensive Aufgabe. Anders als regelungstechnische Algorithmen – beispielsweise zum Ansteuern eines Motors – sind hier komplexe Mustererkennungen notwendig. [...]

Künstliche Intelligenz (KI) und Maschinelles Lernen (ML) spielen eine zentrale Rolle beim Autonomen Fahren. Mithilfe dieser Technologien können Daten der Sensoren im Fahrzeug in Echtzeit analysiert und verarbeitet werden. Um diese Verfahren so einzusetzen, dass das Gesamtsystem verlässlich bleibt, ist die Absicherung Künstlicher Intelligenz notwendig. Dabei müssen spezielle Methoden eingesetzt und Prozesse eingehalten werden.“¹⁸

Mercedes-Entwicklungsvorstand Jörg Burzer sprach Anfang März 2026 gegenüber der Frankfurter Allgemeinen Sonntagszeitung von großen Fortschritten in der Softwareentwicklung in den vergangenen zwölf Monaten, vor allem hinsichtlich sogenannter End-to-end-Software (E2E):

„Mit der auf Künstlicher Intelligenz basierenden E2E-Technik sei das Software-Training erheblich schneller möglich als noch vor kurzer Zeit, sagt Burzer. „Das ist ein Gamechanger. Dank E2E lernt die Software quasi zu reagieren, statt vordefinierte Standards zu befolgen.“ Der Name „End to End“ leitet sich daraus ab, dass die Software für das autonome Fahren auf einem einzigen großen KI-Modell basiert, quasi von Anfang bis Ende.“¹⁹

Gegenüber der Frankfurter Allgemeinen Sonntagszeitung verwies auch ein Manager der Robert Bosch GmbH auf die Entwicklung, die in der näheren Vergangenheit durch KI ermöglicht wurde. Er erwartet eine baldige Markteinführung von Level-3-Systemen:

16 Ebd.

17 Fuchslocher (2025): Welche Sensoren benötigen autonome Autos?, automotiveIT, <https://www.automotiveit.eu/autonomes-fahren/welche-sensoren-benoetigen-autonome-autos/921673>.

18 Fraunhofer-Institut für Experimentelles Software Engineering (IESE): Autonomes Fahren, <https://www.iese.fraunhofer.de/de/trend/autonomes-fahren.html>.

19 Theurer (2026): Das fahrerlose S-Klasse-Taxi könnte noch dieses Jahr kommen, Frankfurter Allgemeine Sonntagszeitung, <https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/mercedes-setzt-auf-robotaxis-wir-erleben-ein-technologisches-schluesselmoment-accg-110845290.html>.

„In zwei bis drei Jahren könnten Level-3-Systeme auch in Deutschland und anderen europäischen Ländern in Serienfahrzeugen verfügbar sein, erwartet Bosch. Es wäre der zweite Anlauf für diese Technik: Die erste Generation solcher elektronischen Helfer, die noch nicht auf KI-Software basierte, fiel bei den Kunden durch. Mercedes präsentierte 2021 einen Autopiloten für das Topmodell S-Klasse, der damals zwar eine Techniksensation war, aber am Markt floppte. Bosch will das jetzt mit geballter KI-Power besser hinbekommen. Damit sich die Autopiloten durchsetzen, müssten sie kostengünstiger werden und mehr praktischen Nutzen bringen, sagt [Bosch-] Manager Heyn.“²⁰

4. Technische Herausforderungen

Im Auftrag des damaligen Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz erstellten das Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO) und das Center of Automotive Management (CAM) eine Übersichtsarbeit zu automatisierten und vernetzten Fahrsystemen (AVF):

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO) und Center of Automotive Management (CAM) (2024): Deutschland zum Innovationsstandort für das automatisierte und vernetzte Fahren machen – Herausforderungen und Maßnahmen zur Skalierbarkeit von automatisierten und vernetzten Fahrsystemen (AVF), <http://dx.doi.org/10.24406/publica-2196>.

Die Autoren identifizierten die Herausforderungen bzgl. der Skalierbarkeit von AVF der SAE-Level 3 und 4 u. a. im Bereich „Technologie und Technik“ anhand von Fachliteratur und Expertenwissen (Experteninterviews, Workshop, „Call of Evidence“).²¹ Die folgenden Abschnitte basieren auf dieser Übersichtsarbeit.

4.1. Allgemeine Einschätzung

Die Autoren erstellten eine „Rangliste der zehn als am relevantesten identifizierten Herausforderungsfelder über alle Anwendungsfälle hinweg“²². Die „Technischen Einzelherausforderungen“ nehmen auf dieser Rangliste den siebten Platz ein. Die Autoren führen aus:

„Auf den Plätzen sieben bis zehn der Rangliste werden maßgeblich die gesellschaftlichen und technischen Herausforderungen in Form technischer Einzelherausforderungen, unvollständiger Wertschöpfungsketten, fehlender Nutzerakzeptanz sowie Sicherheitsempfinden aufgeführt, die teilweise nicht mehr als primäre Hürden für die Skalierung von AVF-Systemen wahrgenommen werden. [...] In Bezug auf die technischen Einzelherausforderungen ist

20 Theurer (2026): „Das ist ein Meilenstein für das automatisierte Fahren“, Frankfurter Allgemeine Sonntagszeitung, <https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/auto-verkehr/weltweit-groesster-autozulieferer-bosch-in-der-krise-ki-software-als-gamechanger-accg-200757044.html>.

21 Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO) und Center of Automotive Management (CAM) (2024): Deutschland zum Innovationsstandort für das automatisierte und vernetzte Fahren machen – Herausforderungen und Maßnahmen zur Skalierbarkeit von automatisierten und vernetzten Fahrsystemen (AVF), Seite 7, <http://dx.doi.org/10.24406/publica-2196>.

22 Ebd., Seite 35.

darauf hinzuweisen, dass erwartet wird, dass sich weitere relevante Herausforderungen erst mit der Skalierung und Erfahrung der Technologien im Anwendungsfall zeigen werden [...]. Dementsprechend stellen diese keine direkte Hürde für die Skalierung dar, sondern sind bewertungsbezogen an deren Grenze zu verorten.“²³

4.2. Einzelherausforderungen

Die Autoren der Übersichtsarbeit nennen folgende technische Einzelherausforderungen:

- „Automatisierte Identifizierung von Corner Cases [siehe Abschnitt 4.3] aus Fahrzeug- und Verkehrsbeobachtungsdaten
- Ausreichende Robustheit und Sicherheit (Safety) aller Hardwaresysteme
- Transferierbarkeit/Generalisierbarkeit der KI-Algorithmen
- Fehlende Kontextualisierungskompetenz der KI
- Hoher Energieverbrauch aufgrund notwendiger Rechenleistung
- Notwendigkeit des Umbaus der [Elektrik- und Elektronik-] Architektur
- Gewährleistung der IT-Sicherheit (Security) über den gesamten Fahrzeuglebenszyklus
- Identifizierbarkeit von automatisierten Fahrzeugen (Signal, Funk) und Kommunikation mit nichtautomatisierten Verkehrsteilnehmern“²⁴

Die Autoren bewerten diese Herausforderungen wie folgt:

„Bei Betrachtung der obenstehenden Ausführungen zeigt sich einerseits, dass die technologischen und technischen Herausforderungen in Abhängigkeit [des konkreten Anwendungsfalls] noch sehr umfangreich sind und zahlreiche Disziplinen betreffen. Die atomaren Einzelherausforderungen lassen sich andererseits in der überwiegenden Mehrzahl der Fälle durch einzelne Akteure bewältigen und bedeuten mit Blick auf die Funktion des automatisierten Fahrens schon heute höchstens einen höheren Aufwand oder einen eingeschränkten Komfort in spezifischen [Anwendungsfällen] des Level-3- und Level-4-Betriebs.“²⁵

4.3. Kontrollierbare Umgebung vs. Corner Cases

Die Autoren der Übersichtsarbeit weisen darauf hin, dass die Herausforderungen stark von den konkreten Einsatzfeldern abhängen:

23 Ebd., Seite 38.

24 Ebd., Seite 28.

25 Ebd., Seite 28.

„Die technologischen und technischen Herausforderungen zur Realisierung der Skalierbarkeit von AVF-Systemen sind in ihrer Nennung abhängig vom gewählten Automatisierungsgrad (Level 3 oder Level 4) sowie dem Bereich, in dem die automatisierten Fahrzeuge operieren sollen [...] divers.

Bei Level-3-Systemen im niedrigen Geschwindigkeitsbereich auf spezifischen Autobahnen unter guten Sichtbedingungen ist bereits heute ein Serieneinsatz möglich und auch im Realbetrieb zu beobachten [...]. Entsprechende technische Herausforderungen scheinen daher bei [diesem begrenzten Anwendungsfall] nicht mehr gegeben zu sein.“²⁶

Herausfordernd sind vielmehr sogenannte „Corner Cases“, also „seltene, situationsgebundene Grenz- beziehungsweise Sonderfälle, mit denen die AVF-Systeme konfrontiert werden.“²⁷ Genannt werden z. B. „verkleidete Personen an Halloween“, Rettungskräfte oder betrunkene Verkehrsteilnehmer.²⁸ „Da die AVF-Systeme hierbei nicht an eine fahrende Person übergeben dürfen, sind die Fälle im Rahmen der Level-4-Automatisierung zuverlässig zu lösen.“²⁹ Die Autoren führen aus:

„Insbesondere im urbanen Kontext ist daher der Umgang mit der „Offenen-Welt-Problematik“ und mit der Komplexität der Verkehrsumgebung für das Fahrzeugverhalten noch als Herausforderung zu bezeichnen. Dies gilt umso mehr, da die geographische Transferierbarkeit der technischen Lösungen auf die genannten Herausforderungen nicht ohne Weiteres gewährleistet werden kann. Zwar werden die notwendigen, technischen Fähigkeiten von hochentwickelten AVF-Systemen für spezifische Anwendungsfälle wie Autobahnfahren oder Innenstadtfahren in großen Teilen identisch sein. Jeder Betriebsbereich stellt allerdings zusätzliche, spezifisch-eigene Herausforderungen im Hinblick auf einzigartige geographische Gegebenheiten, Straßennetz und -infrastruktur sowie Verkehrsteilnehmer. Dies verursacht aktuell im Bereich der Level-4-Systeme hohe, zusätzliche Aufwände für die Definition des Umgangs, die Kartierung, das Training und die Anpassung der Systeme zur Bewältigung dieser bereichsspezifischer Corner Cases [...].“³⁰

4.4. Sensorik

Zur Sensortechnik führen die Autoren der Übersichtsarbeit aus:

„Generell ist zwar mit heute verfügbaren Sensoren bei geeigneten Umweltbedingungen schon eine detaillierte Erfassung der Fahrzeugumgebung möglich, bei bestimmten adversen

26 Ebd., Seite 26.

27 Ebd., Seite 27.

28 Ebd., Seite 27.

29 Ebd., Seite 27.

30 Ebd., Seite 27.

Wetterlagen wie beispielsweise starkem Regen oder Schneefall liefert sie jedoch teilweise noch keine zuverlässigen Ergebnisse.“³¹

Dieser Herausforderung zu begegnen ist vor allem aufwändig und teuer:

„Entsprechend muss bei unbeständigen Bedingungen unterschiedliche Sensorik zur Umfeldfassung zum Einsatz kommen. Dadurch können gegenseitige Unzulänglichkeiten bei diversen Umweltbedingungen ausgeglichen werden. Der Einbau unterschiedlicher Sensoren erhöht allerdings gleichzeitig die Kosten und den Aufwand, was eine Skalierbarkeit des AVF-Systems aus wirtschaftlichen Gründen wiederum erschwert.“³²

4.5. Infrastruktur

Die Autoren der oben genannten Übersichtsarbeit weisen darauf hin, dass technische Herausforderungen nicht nur hinsichtlich eines einzelnen Fahrzeugs bestehen, sondern auch die Infrastruktur betreffen:

„Eine zentrale Voraussetzung für AVF-Systeme aller Automatisierungsgrade ist ein flächendeckender und standardisierter Infrastrukturausbau in der für den Anwendungsfall jeweils relevanten [Umgebung]. Der Begriff des standardisierten Infrastrukturausbaus ist dabei im Hinblick auf die Art und Weise des Ausbaus („In welchen [Umgebungen] mit welcher Priorität?“) sowie der dabei genutzten Technologien zu verstehen. Dieser schreitet in Deutschland zwar voran, ist von einer umfassenden Abdeckung des gesamten Bundesgebiets aber noch weit entfernt [...], was sich auch negativ auf die Skalierbarkeit von AVF-Systemen auswirkt. Als konkrete Herausforderungen werden in diesem Kontext zeitliche Verzögerungen und der nur langsam voranschreitende flächendeckende Ausbau der Kabel- sowie Mobilfunk-Breitbandkommunikation, der Energieinfrastruktur und der V2X³³-Infrastruktur genannt. Funklöcher, in denen noch keine Mobilfunkabdeckung vorhanden ist, existieren noch immer. In einigen Regionen ist ein mobiler Zugang zum Internet nicht möglich oder Bandbreiten sind auch im kabelgebundenen Netz sehr stark begrenzt, was die Kommunikation für Updates, dynamische Anpassungen, Online-Kartendaten und aktuelle Verkehrsinformationen beeinträchtigt [...]. Intelligente Infrastruktursysteme im Bereich V2X, die für das autonome Fahren erforderlich aber auf diese Infrastruktur angewiesen sind, können nicht genutzt oder installiert werden. Die beschriebene Situation einer fehlenden großflächigen V2X-Infrastruktur stellt eine Behinderung der Skalierung und damit eine Herausforderung dar. Als Herausforderung tritt zusätzlich auf, dass es Kommunen an finanzieller und organisatorischer Unterstützung für den Aufbau geeigneter Straßen- und Verkehrssteuerungsinfrastrukturen fehlt. Dies betreffe insbesondere kleinere Kommunen mit begrenzten Personalressourcen. Des Weiteren könne die öffentliche Hand die entsprechenden Infrastrukturdaten zwar bereitstellen, allerdings als Betreiber aus regulatorischen Gründen keine rechtlichen Garantien für die Verfügbarkeit dieser

31 Ebd., Seite 26.

32 Ebd., Seite 26. f.

33 V2X (Vehicle-to-Everything) bezeichnet die Kommunikation von Fahrzeugen mit ihrer Umgebung, also mit anderen Verkehrsteilnehmern und der baulichen Infrastruktur. Das geschieht in der Regel über WLAN oder Mobilfunk.

abgeben. Bereitgestellte Daten können daher aktuell nur als Anreicherung der fahrzeugeigenen Perzeption genutzt werden.“³⁴

Auch die Fachzeitschrift *automotiveIT* geht auf die Bedeutung der Infrastruktur ein und betont die Notwendigkeit einheitlicher Standards:

„Damit Fahrzeuge sicher und effizient agieren können, müssen sie sich als aktiver Bestandteil einer digitalen Verkehrsinfrastruktur verstehen. Der kontinuierliche Austausch von Informationen zwischen Fahrzeugen und ihrer Umgebung [...] ist entscheidend, insbesondere in Situationen, in denen die Bordtechnik an ihre Grenzen stößt, etwa bei schlechter Sicht oder hinter Hindernissen. Ein zentrales Problem bleibt die fehlende Einigung auf einen einheitlichen Kommunikationsstandard. [...] Diese Uneinigkeit erschwert die Interoperabilität und damit die breite Einführung vernetzter Systeme.“³⁵

5. Betriebsmodelle

Die oben genannte Übersichtsarbeit des Fraunhofer-Instituts für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO) und des Center of Automotive Management (CAM) zu automatisierten und vernetzten Fahrsystemen (AVF) unterscheidet drei Betriebsmodelle:

- „Personentransport, wobei das Fahrzeug der fahrenden Person gehört („Ownership“-Betriebsmodell),
- Personentransport, wobei das Fahrzeug der geteilten Nutzung unterliegt („Sharing“-Betriebsmodell), und
- Güterlogistik („Logistics“-Betriebsmodell).“³⁶

Die Autoren weisen darauf hin, dass es bzgl. der zu überwindenden Herausforderungen bedeutende Überschneidungen zwischen den drei Betriebsmodellen gibt:

„Insbesondere das Herausforderungsfeld „Unsicherheit bezüglich der Umsetzung regulatorischer Rahmenbedingungen“ wird in allen drei Bereichen mit Ausnahme der Level-3-Anwendungsfälle [...] hoch priorisiert, was bei Betrachtung der Absichten potenzieller Level-4-

34 Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO) und Center of Automotive Management (CAM) (2024): Deutschland zum Innovationsstandort für das automatisierte und vernetzte Fahren machen – Herausforderungen und Maßnahmen zur Skalierbarkeit von automatisierten und vernetzten Fahrsystemen (AVF), Seite 34, <http://dx.doi.org/10.24406/publica-2196>; im Original mit weiteren Quellenhinweisen.

35 Gilger (2025): Der große Überblick zum autonomen Fahren, *automotiveIT*, <https://www.automotiveit.eu/autonomes-fahren/der-grosse-ueberblick-zum-autonomen-fahren/904041>.

36 Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO) und Center of Automotive Management (CAM) (2024): Deutschland zum Innovationsstandort für das automatisierte und vernetzte Fahren machen – Herausforderungen und Maßnahmen zur Skalierbarkeit von automatisierten und vernetzten Fahrsystemen (AVF), Seite 8, <http://dx.doi.org/10.24406/publica-2196>.

Fahrzeugsystemhersteller, die Fahrsysteme über lokal-definierte Umgebungen hinweg entwickeln und zulassen möchten, nachvollziehbar ist.“³⁷

Auf die Unterschiede zwischen den drei Betriebsmodellen in den Herausforderungen wird im Folgenden kurz eingegangen.

5.1. Ownership

Bzgl. des Betriebsmodells „Ownership“ stellen die Autoren relevante Herausforderungen fest, die sich aus einem möglichst große Einsatzgebiete eines Fahrzeugs ergeben:

„So werden in den Level-4-Anwendungsfällen des Bereichs „Ownership“ die technischen Einzelherausforderungen als auch der fehlende flächendeckende und standardisierte Infrastrukturausbau als relevant bewertet [...]. Dies ist damit zu erklären, dass vielversprechende und skalierende Anwendungsfälle im Ownership-Bereich [große Einsatzgebiete] realisieren müssen. Dafür ist sowohl eine standardisierte Infrastruktur relevant als auch die Überwindung mehrerer noch existierender technischer Herausforderungen (z. B. eingeschränkte Sicht- bzw. Lichtverhältnisse und ungünstige Wetterlagen wie Regen, Schnee, Dunkelheit, starkes Gegenlicht [...]) notwendig.“³⁸

Zu „Ownership“ im Bereich Level 3 schreiben die Autoren:

„Insgesamt werden in diesem Kontext die Herausforderungen für die Skalierbarkeit deutlich geringer eingestuft und dafür wertschöpfungsbezogene Herausforderungen aufgrund der teilweise bereits erfolgten Markteinführung deutlich höher bewertet [...].“³⁹

5.2. Sharing

Die Autoren der Übersichtsarbeit erwarten, dass Fahrzeuge im Betriebsmodell „Sharing“ in kleineren Gebieten eingesetzt werden als im Bereich „Ownership“. Regulatorische Herausforderungen und

„Herausforderungen bezüglich einer flächendeckenden Infrastruktur [werden] aufgrund eines begrenzten Betriebsbereichs nicht derart hoch bewertet [...]. Im „Sharing“-Bereich spielen stattdessen die zwei Themenbereiche der Nutzerakzeptanz sowie des noch nichtexistierenden Markts für Level-4-Systeme und damit verbundener Kostenstrukturen eine relevante Rolle [...].“⁴⁰

37 Ebd., Seite 38.

38 Ebd., Seite 38 f.

39 Ebd., Seite 39.

40 Ebd., Seite 39.

Die Fachzeitschrift automotiveIT misst dem ÖPNV als Testfeld für AVF große Bedeutung zu⁴¹ und verweist auf ein Projekt der Hamburger Hochbahn, bei dem der Testbetrieb bereits begonnen hat.⁴²

5.3. Logistics

Beim Betriebsmodell „Logistics“ muss laut Autoren der oben genannten Übersichtsarbeit nach dem Einsatzgebiet differenziert werden:

„Der „Logistics“-Bereich weist insgesamt eine geringere Bewertung der Herausforderungen als alle bisher betrachteten Level-4-Systeme auf [...]. Dies ist darin begründet, dass ein Teil der Anwendungsfälle auf privatem Gelände stattfinden und damit entsprechende Rahmenbedingungen geringerer Reglementierung unterliegen beziehungsweise leichter zu beeinflussen sind. Für die Anwendungsfälle im öffentlichen Raum (z. B. Last-Mile-Logistik) wird hingegen nach wie vor die Unsicherheit bezüglich der regulatorischen Umsetzung als sehr hoch eingestuft.“⁴³

Auch die Fachzeitschrift automotiveIT erklärt, warum autonome Lkw schneller in die Praxis überführt werden könnten als Pkw:

„Unternehmen wie MAN testen bereits fahrerlose Lastwagen auf deutschen Autobahnen, etwa zwischen München und Nürnberg, um die Machbarkeit im realen Betrieb zu prüfen. Die Vorteile liegen auf der Hand: strukturierte Umgebungen, planbare Routen und ein hoher Bedarf an Automatisierung machen den Güterverkehr zu einem idealen Einstiegspunkt für autonomes Fahren.“⁴⁴

41 Gilger (2025): Der große Überblick zum autonomen Fahren, automotiveIT, <https://www.automotiveit.eu/autonomes-fahren/der-grosse-ueberblick-zum-autonomen-fahren/904041>.

42 Hochbahn: Autonome On-Demand-Shuttles – HOCHBAHN bringt autonomes Fahren nach Hamburg, <https://www.hochbahn.de/de/projekte/autonomer-busverkehr/alike>.

43 Ebd., Seite 40.

44 Gilger (2025): Der große Überblick zum autonomen Fahren, automotiveIT, <https://www.automotiveit.eu/autonomes-fahren/der-grosse-ueberblick-zum-autonomen-fahren/904041>.