



Deutschland zum Innovationsstandort für das automatisierte und vernetzte Fahren machen

Herausforderungen und Maßnahmen zur Skalierbarkeit von automatisierten und vernetzten Fahrsystemen (AVF)

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR ARBEITSWIRTSCHAFT UND ORGANISATION IAO
CENTER OF AUTOMOTIVE MANAGEMENT (CAM)

DEUTSCHLAND ZUM INNOVATIONS- STANDORT FÜR DAS AUTOMATISIERTE UND VERNETZTE FAHREN MACHEN

Herausforderungen und Maßnahmen zur
Skalierbarkeit von automatisierten und
vernetzten Fahrsystemen (AVF)

Auftraggeber:

Bundesministerium
für Wirtschaft und Klimaschutz
(BMWK)

Zur Unterstützung des



EXPERTENKREIS
TRANSFORMATION DER
AUTOMOBILWIRTSCHAFT
Ad-hoc-Arbeitsgruppe „Smart Car“

DEUTSCHLAND ZUM INNOVATIONS- STANDORT FÜR DAS AUTOMATISIERTE UND VERNETZTE FAHREN MACHEN

Herausforderungen und Maßnahmen zur
Skalierbarkeit von automatisierten und
vernetzten Fahrsystemen (AVF)

Lukas Block, Dr. Florian Herrmann, Jens Wizl und Daniel Borrmann
Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO

Prof. Dr. Stefan Bratzel und Felix Bötter
Center of Automotive Management (CAM)

Inhalt

| | |
|---|-----------|
| Management Summary | 4 |
| 1 Einleitung | 5 |
| 1.1 Motivation | 5 |
| 1.2 Zielsetzung und Studiendesign | 7 |
| 2 Analyse des Status Quo | 9 |
| 2.1 Anwendungsfälle und relevante Wertschöpfungsfelder..... | 9 |
| 2.2 AVF-Entwicklungsstand im internationalen Kontext | 11 |
| 2.3 Relevante Anwendungsfälle für den Innovationsstandort Deutschland | 18 |
| 3 Herausforderungen hinsichtlich der Skalierbarkeit von AVF-Systemen | 24 |
| 3.1 Methodisches Vorgehen | 24 |
| 3.2 Herausforderungsbereiche | 26 |
| 3.2.1 Technologische und technische Herausforderungen | 26 |
| 3.2.2 Regulatorische und harmonisierungsbezogene Herausforderungen | 28 |
| 3.2.3 Herausforderungen bezüglich Markt, Wertschöpfung und Wettbewerbsposition | 31 |
| 3.2.4 Gesellschaftliche und infrastrukturbezogene Herausforderungen | 34 |
| 3.3 Zentrale Herausforderungsfelder | 35 |
| 3.4 Zentrale Herausforderungen | 41 |
| 4 Handlungsfelder zur Bewältigung der Herausforderungen | 45 |
| 4.1 Förderung skalierungsfähiger Anwendungsfälle nahe Marktreife | 46 |
| 4.2 Aufbau einer Nationalen Koordinationsstelle „Automatisiertes und Vernetztes Fahren“ | 47 |
| 4.3 Definition bundesweit einheitlicher, unbürokratischer Genehmigungsprozesse..... | 50 |
| 4.4 Bewältigung weiterer, ausgewählter Einzelherausforderungen | 52 |
| 4.5 Entwicklung eines harmonisierten Markts | 55 |
| 4.6 Etablieren eines gesellschaftlichen Dialogs, Formulierung eines klaren Bekenntnisses der Regierung und Befähigung des Innovationsstandorts Deutschland..... | 56 |
| 5 Zusammenfassung der Ergebnisse | 58 |
| 6 Anhang | 61 |
| 7 Literaturverzeichnis | 66 |
| 8 Abbildungsverzeichnis | 79 |
| 9 Tabellenverzeichnis | 80 |
| 10 Abkürzungsverzeichnis | 81 |

Das automatisierte und vernetzte Fahren stellt aus wirtschaftlicher, gesellschaftlicher und politischer Perspektive ein relevantes Zukunftsfeld dar. Deutschland als Automobilmation muss die damit verbundenen Potenziale nutzen und eine Vorreiterrolle, sowohl aus Standort- als auch aus Akteursperspektive, anstreben. Es ergibt sich die Frage, wie sich Deutschland systematisch bis zum Ende der Dekade als Innovationsstandort für die Skalierung des automatisierten und vernetzten Fahrens etablieren kann.

Die regulatorischen Voraussetzungen für die Realisierung von automatisierten und vernetzten Fahrsystemen sind in Deutschland durch die entsprechenden Gesetze und Verordnungen bereits heute erfüllt. Trotzdem zeigt sich, dass die Ausgangslage Deutschlands und deutscher Akteure sowohl hinsichtlich des zugrundeliegenden Betriebsmodells als auch des Wertschöpfungsfeldes, in dem die Akteure tätig sind, variiert. Während deutsche Automobilhersteller und -zulieferer eine führende Rolle im Bereich von Fahr- und Parksyste men der Automatisierungsstufen 2 bis 3 einnehmen, bieten bislang ausschließlich chinesische und US-amerikanische Akteure kommerzielle Dienste im Bereich der Robotaxis und Roboshuttles auf Stufe 4 an. Nach Analyse des Akteurs- und Wertschöpfungssystems in Deutschland zeigt sich, dass einerseits die Erfahrung bei der Kommerzialisierung von Level-4-Anwendungsfällen fehlt (35 % der als relevant identifizierten Herausforderungen), Geschäftsmodelle aktuell nicht gewinnbringend erscheinen (36 %) und der untergesetzliche Rahmen für die Zulassung von automatisierten Fahrsystemen als gegenwärtig noch zu unsicher wahrgenommen wird (29 %). Da inländische Organisationen bislang weder auf die orchestrierende Rolle des Staates wie in China noch auf finanzstarke Mutterkonzerne mit hoher Risikokapitaltoleranz wie in den USA zurückgreifen können, ergeben sich für die beteiligten Akteure hohe individuelle Risiken. Dies verhindert angesichts der nicht zu vernachlässigenden Entwicklungs- und Integrationskosten bei der Markterschließung die Entstehung eines übergreifenden Wertschöpfungssystems und führt zu einer Deadlock-Situation. Es fehlen proaktive Impulse zur Entstehung desselben durch die beteiligten Akteure.

Um die beschriebenen Hemmnisse zu überwinden, wird daher empfohlen, in fünf Handlungsfeldern aktiv zu werden. Zur Senkung der genannten individuellen Risiken sollte die **Förderung skalierungsfähiger Anwendungsfälle nahe Marktreife** mit einem klaren Fokus auf die Anwendung und Verbreitung des automatisierten und vernetzten Fahrens angestrebt werden. Der **Aufbau einer nationalen Koordinationsstelle** soll – mit der nationalen Koordinationsstelle als katalysierende Entität – zur Verbesserung des Wissenstransfers sowie der Koordination der jeweiligen Aktivitäten beitragen. Praktische Hürden, die in den Anwendungsfällen identifiziert werden, sollen mit Unterstützung der Koordinationsstelle überwunden werden. Um die Unsicherheit bezüglich der Umsetzung der regulatorischen Vorgaben zu beseitigen und Aufwände bei der Beantragung von Betriebserlaubnis und Betriebsbereichsgenehmigung zu reduzieren, wird außerdem empfohlen, **Genehmigungsprozesse bundesweit einheitlich und unbürokratisch** zu definieren. Die **Bewältigung weiterer, relevanter Einzelherausforderungen** (z. B. der Infrastrukturausbau oder der Aufbau einer Datenbank für Corner Cases) soll als Impuls zur Entstehung eines Ökosystems dienen. Die **Entwicklung eines harmonisierten Markts** für automatisierte und vernetzte Fahrsysteme in Deutschland und der EU soll wiederum die wirtschaftliche und geographische Attraktivität des deutschen Markts steigern.

Die oben genannten Handlungsfelder sind in der vorliegenden Publikation auf Basis einer Analyse der gegenwärtigen Markt-, Technologie- und Wettbewerbstrends sowie auf Basis methodisch identifizierter Herausforderungen abgeleitet. Die Handlungsfelder werden ausführlich beschrieben und hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Entwicklung Deutschlands zu einem Innovationsstandort dargelegt.

Das automatisierte und vernetzte Fahren (AVF) wird in technologischer und gesellschaftlicher Hinsicht eine der großen Herausforderungen der nächsten Jahre sein, dabei aber auch positive wirtschaftliche, ökologische und gesellschaftliche Potenziale bieten. Mit Hilfe von AVF-Technologien kann es beispielsweise gelingen, Unfallzahlen zu reduzieren und die Sicherheit im Straßenverkehr zu erhöhen. Gleichzeitig ermöglicht das automatisierte Fahren – insbesondere mit höheren Automatisierungsgraden – Mobilität für alle Menschen unabhängig von Alter, Gesundheit und sonstigen Einschränkungen. Dies wiederum gestattet eine menschenzentrierte Umgestaltung von Verkehrsräumen, die Verbesserung des Schutzes der Umwelt sowie die Entwicklung attraktiver Produkte und Dienstleistungen für den nationalen und internationalen Markt. Als weitere Potenziale sind eine höhere verkehrstechnische und wirtschaftliche Effizienz sowie die Minderung des Fahrermangels zu nennen.

Am Automobilstandort Deutschland wohnen circa 83 Mio. Menschen, die regelmäßig Mobilität auf dem Weg zur Arbeit, zu Bildungsstätten oder zu Freizeitaktivitäten in Anspruch nehmen. Davon sind knapp 800.000 Personen in der Automobilindustrie beschäftigt und erwirtschafteten zuletzt in Summe einen Umsatz von knapp 400 Mrd. Euro (VDA 2023). Gleichzeitig ist Deutschland Standort für international tätige Automobilhersteller und Zulieferer. So entfielen 2021 circa 23 Prozent der internationalen PKW-Produktion auf deutsche Automobilhersteller; knapp 6 Prozent in inländischer Produktion (VDA 2022), (OICA 2023). Diese Firmen arbeiten aktiv an der Entwicklung von AVF-Technologien und bieten bereits heute Fahrfunktionen mit unterschiedlichen Automatisierungsgraden im Praxisbetrieb an.

Das Potenzial und die Chancen, die sich für Deutschland als Wirtschafts- und Innovationsstandort durch das automatisierte und vernetzte Fahren und die Entwicklung der dafür notwendigen Technologien ergeben, sind daher außerordentlich groß.

1.1 Motivation

In Deutschland wurden im Jahr 2017 mit dem Gesetz zum automatisierten Fahren und im Jahr 2021 mit dem Gesetz zum autonomen Fahren die weltweit ersten gesetzlichen Vorschriften für einen Regelbetrieb von automatisierten Fahrzeugen auf SAE-Level 3 und 4 geschaffen. Im Jahr 2022 wurde mit der Verordnung zur Regelung des Betriebs von Kraftfahrzeugen mit automatisierter und autonomer Fahrfunktion und zur Änderung straßenverkehrsrechtlicher Vorschriften der nationale Rechtsrahmen zum autonomen Fahren vervollständigt. Dies führte entgegen den Erwartungen bislang jedoch nicht zu einer größeren Verbreitung des automatisierten und vernetzten Fahrens in der Bundesrepublik. Der Stand der Technik sind derzeit eine Teilautomatisierung (SAE-Level 3) bei hochpreisigen Personenkraftwagen (Pkw) sowie in der Erprobung befindliche hochautomatisierte Fahrzeuge (SAE-Level 4) in bestimmten Betriebsbereichen und Anwendungen. Im außereuropäischen Ausland werden Fahrzeuge im Level-4-Betrieb bereits in größerer Zahl und in großflächigeren Gebieten erprobt. So sind im US-amerikanischen San Francisco Robotaxis zwar experimentell, aber für den normalen Straßenverkehr auch ohne einen Sicherheitsfahrer zugelassen worden (tagesschau.de 2023). In China dürfen Fahrgäste sogar in mehreren Metropolen (z. B. Peking, Chongqing und Wuhan) vollständig autonom transportiert werden (Pillau 2023). Eine flächendeckende Verbreitung von Level-3- und Level-4-Systemen abseits der sehr abgegrenzt definierten Betriebs- und Experimentierbereiche lässt sich allerdings auch dort nicht beobachten.

Mit dem aktuellen Entwicklungsstand kann das automatisierte und vernetzte Fahren daher im „Hype Cycle for Transportation and Mobility“ nach Gartner Research in der Phase des Tals der Enttäuschungen eingeordnet werden (vgl. Abbildung 1). Während in den vorangegangenen Jahren überzogene Erwartungen die Nachrichten bestimmten und einen übertriebenen Enthusiasmus sowie eine unrealistische Erwartungshaltung gegenüber dem automatisierten Fahren entstehen ließen (Gipfel der überzogenen Erwartungen, vgl. z. B. (Grünweg 2013), (Schaal und Eisert 2015)), zeigt sich aktuell, dass die Technologie nicht alle zuvor in sie gesetzten Hoffnungen erfüllen kann. Gleichzeitig entsteht gegenwärtig jedoch aufgrund der Erprobungen Wissen über die Vor- und Nachteile, den praktischen Nutzen und somit über realistische Einsatzmöglichkeiten des AVF. Damit bewegt sich das automatisierte Fahren in Richtung des sogenannten Plateaus der Produktivität (vgl. Abbildung 1). Das Plateau ist erreicht, wenn die Technologie mit ihren Vor- und Nachteilen sowie Begrenzungen anerkannt sowie gesellschaftlich akzeptiert ist und großflächig in definierten Anwendungsfällen zum Einsatz kommt. Dies muss das Zielbild eines Innovationsstandort sein, denn nur dann stiftet das automatisierte und vernetzte Fahren einen konkreten Kundennutzen, trägt sich wirtschaftlich selbst und verfügt über eine solide technologische Basis. Ausgehend von heute müssen dafür allerdings zuvor technologische und auch gesellschaftliche, ökonomische und organisatorische Herausforderungen gelöst werden (vgl. Pfad der Erleuchtung, Abbildung 1), um die bislang lokal und in begrenzten Operational Design Domains (ODD) operierenden Fahrzeuge großflächig skalieren zu können. Die Skalierbarkeit bezeichnet dabei die Eigenschaft von AVF-Systemen, wirtschaftlich hergestellt, betrieben und unter Beibehaltung des Anwendungsfalls technisch in andere Einsatzgebiete transferiert werden zu können.

Abbildung 1: AVF im Hype Cycle for Transportation and Mobility nach Gartner Research



Quelle: Eigene Darstellung, Grafik aus (Gartner Research 2023)

Skalierbarkeit beschreibt somit die Fähigkeit, den Übergang von einer Erfindung mit lokaler, experimenteller Anwendung in den Markt zu bewältigen (vgl. (Ropohl 2009)). Dafür werden einerseits innovative Akteure benötigt, die international auf Level 3 und 4 als Hersteller und Zulieferer im Wertschöpfungsnetzwerk wettbewerbsfähig sind, und die in der Lage sind, die technologischen, gesellschaftlichen, ökonomischen und organisatorischen Herausforderungen zu bewältigen. Andererseits müssen an einem Innovationsstandort die entsprechenden Anwendungsfälle konkret realisiert, erprobt und großflächig umgesetzt werden, um die notwendige Erfahrung zu sammeln sowie den Beweis für die Skalierbarkeit und den Nutzen der Systeme in den unterschiedlichen Anwendungsmöglichkeiten zu erbringen. Erst durch die Berücksichtigung beider Perspektiven kann eine Positionierung Deutschlands als Innovationsstandort gelingen.

Dabei sind beide Perspektiven inhärent miteinander verknüpft. Dementsprechend ist offensichtlich, dass die Herausforderungen hinsichtlich der Skalierbarkeit von AVF-Systemen aus Perspektive der Akteure und der Anwendungsfälle zu identifizieren und analysieren sind, um entsprechende Ableitungen hinsichtlich zielführender Handlungsbedarfe zur Positionierung als Innovationsstandort vornehmen zu können.

1.2 Zielsetzung und Studiendesign

Ziel dieser Studie ist es, den Status Quo bezüglich des AVF-Innovationsstandorts Deutschland aufzuzeigen, um darauf aufbauend die Herausforderungen der Skalierbarkeit für AVF-Systeme zu identifizieren. Dabei werden beide Perspektiven eines Innovationsstandorts behandelt: Die Perspektive der Akteure und die der Anwendungsfälle. Der Status Quo sowie die identifizierten Herausforderungen legen dann die Grundlage zur Ableitung von Handlungsfeldern und -empfehlungen, um Deutschland mittel- und langfristig zum Innovationsstandort für das automatisierte und vernetzte Fahren zu machen. Entsprechend ergeben sich die folgenden beiden Forschungsleitfragen.

Forschungsleitfrage 1: Welche Herausforderungen bestehen in Technologie, Organisation, Regulatorik und Standardisierung sowie Markteinführung und Wertschöpfung hinsichtlich der Skalierbarkeit automatisierter und vernetzter Fahrzeugsysteme?

Forschungsleitfrage 2: Wie kann die Automobilindustrie in Deutschland auch im Zusammenspiel mit anderen Akteuren diesen Herausforderungen begegnen und sie als Chance zum Aufbau eines Innovationsstandorts nutzen?

Zunächst erfolgt eine ausführliche Analyse des Status Quo (vgl. Kapitel 2). Es werden die Stärken und Schwächen des AVF-Innovationsstandorts Deutschland im internationalen Vergleich herausgearbeitet. Dabei wird sowohl die Position einzelner Akteure im Wertschöpfungsnetzwerk als auch die Umsetzung von Anwendungsfällen im internationalen Vergleich kritisch beleuchtet. Auf Basis der Analyse des Status Quo gelingt anschließend die Bestimmung vielversprechender und skalierbarer AVF-Anwendungsfälle, die im weiteren Verlauf näher betrachtet und z. B. für die Identifikation und Analyse konkreter Herausforderungen benötigt werden.

Im nächsten Schritt werden für die Themenbereiche „Technologie und Technik“, „Regulatorik und Harmonisierung“, „Markt, Wertschöpfung und Wettbewerbsposition“ sowie „Gesellschaft und Infrastruktur“ Herausforderungen identifiziert, die zum Erreichen der Skalierbarkeit von AVF-Systemen zu überwinden sind (vgl. Kapitel 3). Diese Herausforderungen werden zum einen abgeleitet aus Aussagen, die mit Hilfe eines Call for Evidence und bei einem Workshop zum automatisierten und vernetzten Fahren im Rahmen des Expertenkreises Transformation der Automobilwirtschaft (ETA) gewonnen wurden. Zum anderen werden zahlreiche einschlägige Publikationen sowie acht Interviews mit Experten aus der Entwicklung, dem Betrieb und der Zulassung von AVF-Systemen herangezogen. Mit Unterstützung dieser Experten erfolgt anschließend eine Validierung, Strukturierung und Aggregation der Herausforderungen in 18 Herausforderungsfelder und drei zentrale Herausforderungen.

Aufbauend auf den erzielten Erkenntnissen werden Handlungsfelder bestimmt und Handlungsempfehlungen ausgesprochen (vgl. Kapitel 4). Diese betreffen insbesondere die Förderung skalierungsfähiger Anwendungsfälle nahe Marktreife, den Aufbau einer Koordinationsstelle für das AVF, die Definition bundesweit einheitlicher, unbürokratischer Genehmigungsprozesse, die Entwicklung eines harmonisierten Markts sowie die Bewältigung ausgewählter Einzelherausforderungen. Das beschriebene Studiendesign ist in Abbildung 2 schematisch dargestellt.

Der betrachtete Zeithorizont der Studie ist das Jahr 2030 (vgl. z. B. (Schaal 2023)). Der Fokus liegt auf dem Betrieb von AVF-Systemen auf SAE-Level 3 und Level 4. Aktuelle Herausforderungen beim Level 2+ Betrieb werden, wo relevant, mitbetrachtet. Als Anwendungsbereiche herangezogen werden – aufgrund des hierzulande erreichten Stands der Technik sowie des inner- und außerhalb Deutschlands beobachtbaren Bedarfs – folgende 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).

Abbildung 2: Design und Aufbau der Studie



Quelle: Eigene Darstellung

Abschließend ist festzuhalten, dass es nicht Ziel der Studie ist, ein (idealerweise gesellschaftlich tragfähiges) Bild zukünftiger Mobilität unter Nutzung von AVF-Systemen aufzuzeigen. Vielmehr werden Herausforderungen und Stellhebel für den Innovationsstandort Deutschland identifiziert. Aus diesem Grund baut die Studie auf drei möglichen Säulen des AVF-Einsatzes und mehreren Anwendungsfällen auf, die Optionen für diverse Ausgestaltungen des Mobilitätssystems darstellen. Die Handlungsempfehlungen zielen daher auch nicht auf einen der spezifischen Anwendungsfälle ab, sondern müssen im Kontext eines parallel zu erarbeitenden Zukunftsbilds konkret auf die dafür gewünschten Anwendungsfälle appliziert werden. Aufgrund des Innovationsbezugs fokussiert die Studie des Weiteren die Herausforderungen bezüglich einer erfolgreichen Markteinführung und Skalierung von AVF-Systemen. Herausforderungen in der Forschung und Entwicklung der entsprechenden Technologien sind bereits Gegenstand zahlreicher anderer Publikationen mit jeweils eigenständigen Analysen und spezifischen Handlungsempfehlungen (vgl. z. B. (Vargas et al. 2021), (Gao et al. 2023) oder (Seeger 2023)). Diese Veröffentlichung soll komplementär dazu Herausforderungen und Möglichkeiten zu ihrer Bewältigung im Hinblick auf die genannten Themenfelder aufzeigen.

2 Analyse des Status Quo

Ausgehend von der Identifikation relevanter Anwendungsfälle und Wertschöpfungsfelder erfolgt in diesem Kapitel eine Bestandsaufnahme der aktuellen Entwicklungstrends sowie der Wettbewerbs- und Akteurslandschaft. Auf Basis der identifizierten Stärken und Schwächen des Innovationsstandorts Deutschland wird eine Metrik präsentiert, die die vorgestellten Anwendungsfälle auf Basis qualitativer Kriterien gegenüberstellt und eine Priorisierung besonders vielversprechender Fälle empfiehlt.

2.1 Anwendungsfälle und relevante Wertschöpfungsfelder

AVF hat die Chance, einen wesentlichen Beitrag zum vielseitig geforderten nachhaltigen Umbau der Mobilität zu leisten. Fahrzeuge mit autonomen Fahrfunktionen nach SAE-Level 3 und höher bieten sowohl Vorteile für Einzelpersonen und Unternehmen als auch für die breite Gesellschaft. Sie können nicht nur dafür sorgen, dass der Verkehrsfluss optimiert und Verkehrsunfälle reduziert werden, sondern haben auch das Potenzial den absoluten Fahrzeugbedarf durch höhere Nutzungsraten zu senken. Gleichmaßen werden für den operativen Betrieb erhebliche Produktivitäts- und (Kosten-) Effizienzgewinne im Vergleich zu bisherigen Angeboten erwartet (Litman 2020), (McKinsey 2023), (LMC Automotive 2018), (Bitkom 2022).

Für Unternehmen der Mobilitätswirtschaft ergeben sich damit eine Reihe vielversprechender Anwendungsfälle (vgl. Tabelle 1). Hierunter werden hinreichend abgegrenzte Einsatzmöglichkeiten von AVF-Systemen verstanden, die einen spürbaren Kundennutzen bieten und zugleich eine Grundlage für skalierungsfähige Geschäftsmodelle bereitstellen. Auch wenn Personen- und Gütertransport prinzipiell ähnliche Anforderungen an AVF-Systeme haben, ist eine strikte Trennung aufgrund stark variierender Kundenbedürfnisse sowie Unterschiede im Betrieb notwendig. Bei der Personenbeförderung ist zudem eine Differenzierung zwischen nutzungszentrierten („Sharing“) und besitzzentrierten („Ownership“) Betriebsmodellen sinnvoll (Juliussen 2020).

Tabelle 1: Anwendungsfälle von AVF-Systemen im Personen- und Güterverkehr (Auswahl)

| Beförderungsart | Betriebsmodell | Anwendungsfall |
|-------------------|----------------|---|
| Personentransport | Ownership | Autopilot Level 3 (z.B. Staupilot, Autobahnpilot, Landstraßenpilot, City-Pilot) |
| | | Autopilot Level 4 (z.B. Autobahnpilot, Landstraßenpilot, City-Pilot) |
| | | Parkpilot Level 4 (Automated Valet Parking) |
| | Sharing | Robotaxi L4 (Ride-Hailing, on-demand) |
| | | Roboshuttle L4 (Ride-Pooling, on-demand) |
| | | Robobus L4 (Linienverkehr, planmäßig) |
| Gütertransport | Logistics | Kurzstrecke (z.B. Last-Mile Delivery, Inhouse Logistics) |
| | | Mittel- und Langstrecke (z.B. Platooning, Hub-to-Hub Pilot) |

Quelle. Eigene Darstellung in Anlehnung an (Juliussen 2020)

Bevor die genannten Anwendungsfälle im nahtlosen Regelbetrieb abgebildet werden können, sind eine Reihe vorgelagerter und zum Teil differierender Wertschöpfungsaktivitäten zu beachten (vgl. Abbildung 3). Zu den zentralen Handlungsfeldern zählen die Entwicklung des Onboard AVF-Systems, die Herstellung und Absicherung des mit dem AVF-System ausgestatteten Gesamtfahrzeugs, eine Mobilitätsdienstleistungsplattform

für den AVF-Betrieb, Flottendienstleistungen, datenbasierte Mehrwertdienste sowie der Aufbau, die Ertüchtigung und der Betrieb von Infrastruktur (Bratzel et al. 2023). Zwar ist prinzipiell ein einmal entwickeltes und ausreichend trainiertes AVF-System für viele Anwendungsfälle adaptierbar, aus den unterschiedlichen Einsatzszenarien ergeben sich jedoch teils unterschiedliche bzw. zusätzliche Aufgabenbereiche. So sind Sharing- und Logistics-Anwendungen beispielsweise auf Vermittlungs- und Flottendienstleistungen angewiesen, während Ownership-Fahrzeuge diese nicht benötigen. Ebenso gibt es teilweise variierende Anforderungen an die technische Ausstattung der Fahrzeuge, die Ausgestaltung von Mehrwertdiensten sowie den Aufbau von zusätzlicher Infrastruktur (z.B. Drop-Off-Zonen, Hubs).

Abbildung 3: Zentrale AVF-Wertschöpfungsfelder in Abhängigkeit des Betriebsmodells

| Zentrale Wertschöpfungsfelder | Ownership | Shared | Logistics |
|--|--|---|--|
| Autonomes Fahrsystem: • Bereitstellung von Hardware & Software für autonomes Fahrzeuge | Level 3 und 4 (bzw. 5) | Level 4 (bzw. 5) | Level 4 (bzw. 5) |
| Digitale Mobilitätsplattform: • Angebotsplattform für den Betrieb von autonomen Fahrdiensten | - | Fahrvermittlungsplattform, Teleoperation-Center | Gütervermittlungsplattform, Teleoperation-Center |
| Fahrzeuherstellung: • Entwicklung und Produktion der (autonomen) Fahrzeuge | Premium/Volumen, Interface, Interieur | Special Purpose Vehicle, z.B. Roboshuttle | Special Purpose Vehicle, z.B. Delivery Van |
| Flottendienstleistungen: • Betrieb (Reinigung/Wartung/Reparatur) der autonomen Fahrzeugflotten | - | Sauberkeit, Maintenance | Auslastungsplan, Maintenance |
| Content & Services: • Zusatzdienste im autonomen, vernetzten Fahrzeug (Entertainment, Business etc.) | Entertainment, E-Commerce, Mobile Office | Entertainment, E-Commerce, Mobile Office | Freight Handling |
| Infrastruktur: • Aufbau/Betrieb der Kommunikations-, Tank-/Lade- und Serviceinfrastruktur | Markenübergreifende V2X-Kommunikation | Separate Fahrstreifen, (Virtuelle) Haltestellen | Drop Off Zonen, Hubs/Terminals |

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Bratzel et al. 2023) | *SPV = Special Purpose Vehicle

Zweifelsfrei gehört jedoch die Entwicklung und Bereitstellung des Fahrsystems zu den wichtigsten Wertschöpfungsfeldern. Hierunter ist allgemein die im Fahrzeug befindliche technische Basis zu verstehen, die einen autonomen Fahrbetrieb ermöglicht. Für die erfolgreiche Entwicklung eines solchen Systems sind diverse Hardware- (z.B. Sensorik, Aktuatorik, Recheneinheiten) und Software-Kompetenzen (z.B. Basissoftware, Sensorauswertung, Fahrschlauchalgorithmus) erforderlich. Zudem muss Knowhow in übergreifenden Bereichen wie Cybersecurity oder Cloud-Computing vorliegen, um eine ausreichende Systemsicherheit sowie Anpassungs- und Updatefähigkeit zu gewährleisten (Hong 2020). Der Entwicklungs-, Implementierungs- und Absicherungsaufwand variiert je nach Anwendungsfall und erhöht sich insgesamt mit zunehmendem Autonomiegrad.

Aufgrund der technischen Komplexität sowie der Use-Case-spezifischen Adaptionsmöglichkeit sind für diesen Bereich mittel- bis langfristig die größten Wertschöpfungs- und Profitpotenziale zu erwarten. Hochrechnungen der Unternehmensberatung McKinsey kommen etwa zu dem Ergebnis, dass der globale Markt für Hardwareumfänge wie ECU/Control Units, Kameras, Lidar- und Radarsensoren bis zum Jahr 2030 auf 55 bis 80 Mrd. US-Dollar anwachsen könnte (2021: 8 bis 12 Mrd. US-Dollar). Auch für den zugehörigen Software-Bereich sehen die Experten ein Wachstumspotenzial von jährlich rund 10 Prozent (CAGR 2019-2030). Damit würden Betriebssysteme, Middlewares sowie spezifische Softwaresysteme für Autonomes Fahren in etwa 50 Mrd. US-Dollar bis 2030 erreichen (McKinsey 2019), (McKinsey 2023). Die PwC-Tochter Strategy& taxiert die erwartbaren Robotaxi-Umsätze, die sich aus dem Fahrzeugverkauf und den Fahrdiensten in großen Städten ergeben, global auf 500 Mrd. US-Dollar bis zum im Jahr 2035 (strategy& 2022).

2.2 AVF-Entwicklungsstand im internationalen Kontext

Im Mobilitätsalltag vieler Menschen liegt das automatisierte und vernetzte Fahren bislang noch in weiter Ferne. Schätzungen der Analytenfirma canals gehen zum Beispiel davon aus, dass Ende 2020 nur rund jedes zehnte im globalen Fahrzeugbestand (etwa 1 Mrd. Pkw) befindliche Auto überhaupt mit Fahrassistenzfunktionen (bis Level 2) wie Abstandsregeltempomat, Spurhalteassistent oder Totwinkelwarner ausgestattet war (Canalys 2021). Auch wenn aktuelle Fahrzeuggenerationen immer häufiger diese Ausstattungsmerkmale serienmäßig besitzen, ist dennoch ein technologisches Plateau erkennbar. Nur wenigen Automobilunternehmen gelingt es bisher, ihren Kundinnen und Kunden automatisierte Fahrfunktionen (oder teilautonome Zwischenstufen wie Level 2+) bereitzustellen.

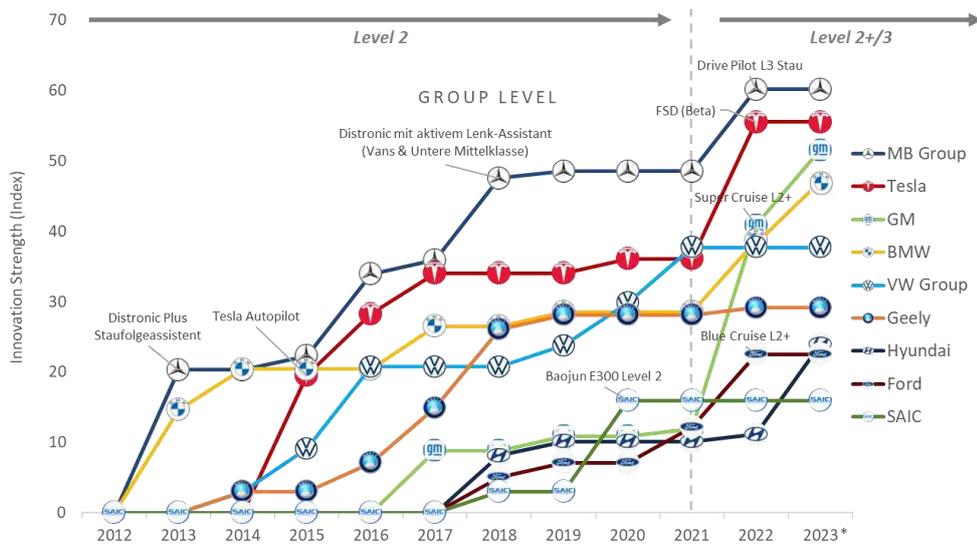
Langzeitanalysen des Center of Automotive Management (CAM) zur Innovationsstärke globaler Automobilhersteller im Bereich „Autonomes Fahren Level 2, 2+ und 3“ zwischen den Jahren 2012 und 2023 bestätigen den inkrementellen Fortschritt im Ownership-Betriebsmodell (vgl. Abbildung 4).¹ Demnach liegt die Mercedes-Benz Group als einziger Hersteller mit einem in Deutschland und Teilen der USA verfügbaren Level 3 Staupilot (bis 60 km/h) auf dem ersten Platz.² Der US-Hersteller Tesla, dessen Self-Driving Beta (Level 2+) in Nordamerika in einem umfangreichen Betriebsbereich verfügbar ist, folgt kurz dahinter. Auch General Motors macht mit seinem Super Cruise bzw. für Ende 2023 angekündigten Ultra Cruise System große Entwicklungssprünge.

Die weiteren deutschen Automobilhersteller BMW und Volkswagen folgen auf den Rängen vier und fünf. BMW bietet für den 7er in den USA und für die neue 5er Limousine in Deutschland einen Highway-Pilot (Level 2+) an (Geiger 2023) und stellt ein Level 3 System für den 7er noch im Jahr 2023 in Aussicht (BimmerToday.de 2023). Auch Ford hat mit Blue Cruise bereits einen Highway-Piloten (Level 2+) in den USA und Teilen Europas im Angebot. Abseits von Tesla können bislang nur die chinesischen Akteure Xiaopeng und Arcfox (BAIC-Konzern) Level 2+ Systeme in wenigen Städten (z.B. Guangzhou, Shanghai, Shenzhen) und auf ausgewählten Streckenabschnitten anbieten. Insgesamt zeigt sich aber, dass die deutschen Hersteller im Ownership Betriebsmodell des automatisierten Fahrens im Wettbewerbsvergleich derzeit eine führende Rolle einnehmen (vgl. auch Anhang 1).

¹ Das CAM ermittelt die Innovationsstärke auf Basis des MOBIL-Ansatzes. Demnach sind Innovationen fahrerzeugtechnische Neuerungen, die aus Kundenperspektive einen spürbaren Zusatznutzen gegenüber dem Status Quo bieten. Diese Innovationen werden dann in den Dimensionen Reifegrad (Maturity), Originalität (Originality), Nutzenfaktoren (Benefits) und Innovationsgrad (Innovation Level) bewertet, vgl. (Bratzel und Teller mann 2023)

² Honda führte in Japan mit dem Modell „Legend“ bereits im März 2021 einen automatisierten Staupiloten bis 50 km/h (Level 3) ein. Allerdings steht die Kleinserie von 100 Fahrzeugen nur eingeschränkt und zu besonderen Leasing-Konditionen zur Verfügung.

Abbildung 4: Kumulierte Innovationsstärke „Autonomes Fahren Level 2, 2+ und 3“ (Auswahl)



LZ002 Source: CAM | * Anm.: 2023 nur 1. Halbjahr, unkonsolidiert

n = 154

Quelle: Eigene Darstellung | Anm.: Nur Serieninnovationen, inkl. Welt- und Konzernneuheiten

Im nutzungsorientierten Sharing-Betriebsmodell gibt es bereits erste kommerzielle Angebote von autonomen Fahrdienstleistungen (vgl. Tabelle 2). Diese fokussieren sich jedoch geographisch auf einzelne urbane Hotspots in den USA und China und erreichen selbst dort noch vergleichsweise wenige Menschen. Waymo, zugehörig zum Alphabet-Konzern, sowie die GM-Tochter Cruise gehören neben Apollo, einem Unternehmen des chinesischen Suchmaschinenkonzerns Baidu, gegenwärtig zu den führenden Anbietern von Robotaxi-Dienstleistungen. Dabei profitieren sie einerseits von ihren finanzstarken Mutterkonzernen, die über lange Zeit hohe operative Verluste¹ verkraften können, und andererseits einer umfassenden politischen Orchestrierung (insb. China). Zusammen betreiben Apollo, Cruise und Waymo mittlerweile eine Flotte von schätzungsweise mehr als 1.500 Fahrzeugen und absolvierten bereits mehrere Millionen Fahrten mit Fahrgästen – davon auch zahlreiche ohne Sicherheitsfahrer an Bord. Zudem verfügen die Anbieter über einen umfangreichen Erfahrungsschatz: Allein im Jahr 2022 legten Waymo und Cruise rund 6,1 der insgesamt 8,2 Mio. autonomen Testkilometer im US-Bundesstaat Kalifornien zurück (California DMV 2023). Apollo fuhr in der chinesischen Hauptstadt Peking im selben Zeitraum sogar mehr als 14 der insgesamt 18 Mio. zurückgelegten Kilometer (BICMI 2022).

Jüngst publik gewordene Verkehrsunfälle von Cruise-Robotaxis mit anderen Verkehrsteilnehmern (darunter auch Passanten) werfen jedoch die Kommerzialisierungspläne des etablierten US-Anbieters zurück. So wurde dem Unternehmen nicht nur die Fahr- und Beförderungslizenz für den Bundesstaat Kalifornien entzogen, auch stellte Cruise seinen gesamten Fahrdienst aufgrund mangelnden Vertrauens vorübergehend ein (SPIEGEL 2023), (Korosec 2023). Die geplante Serienproduktion der neuen Fahrzeug-

¹ Die GM-Tochter Cruise steht exemplarisch für die hohen Entwicklungsaufwendungen bei der Kommerzialisierung autonomer Fahrdienste. Zwischen 2019 und 2022 erzielte die Geschäftseinheit Umsätze in Höhe von 411 Mio. USD. Dem gegenüber stehen kumuliert operative Verluste in Höhe von 6,6 Mrd. USD. Auch im ersten Halbjahr 2023 stehen 51 Mio. USD an Umsätzen einem negativen EBIT von 1,3 Mrd. USD entgegen.

generation namens „Origin“ stoppte der Mutterkonzern GM ebenfalls (Bellan 2023b). Unter Gewerkschaften (z.B. Rideshare Drivers United), Stadtregierungen (Los Angeles) und Teilen der US-Bevölkerung war die wegweisende Entscheidung der kalifornischen Behörde CPUC zur Ausweitung von autonomen Beförderungsdiensten im August 2023 ohnehin stark umstritten (Weber 2023). Es zeigt sich, dass eine transparente und vertrauensvolle Zusammenarbeit zwischen Anbietern und Behörden bei der Einführung autonomer Fahrzeuge einen wichtigen Einfluss- und Akzeptanzfaktor darstellt. Die nunmehr eingeleitete umfassende Aufarbeitung der Vorfälle hat weitreichende Konsequenzen für Cruise und GM. Gleichwohl dürften die Auswirkungen auf den grundsätzlichen Expansionstrend autonomer Fahrdienste überschaubar bleiben.

Analyse des Status Quo

Tabelle 2: Übersicht führender Akteure bei der Kommerzialisierung autonomer L4-Sharing-Angebote (Auswahl)

Analyse des Status Quo

| Akteur | Standorte | Flotte | Fahrerfahrung | Besonderheiten/ ODD | |
|--|--------------------------|---|--------------------|---|--|
| I N N O V A T O R E N | Apollo Go (Baidu) | 30 Städte (inkl. Testzonen), davon 12 kommerziell | ≈ 600 | 60+ Mio. Testkilometer; 3+ Mio. kommerzielle Fahrten | Kommerzieller Fahrdienst <u>ohne Sicherheitsfahrer</u> in Chongqing, Peking, Shenzhen und Wuhan |
| | Waymo (Alphabet) | 4 Städte (inkl. Testgebiete), davon 2 kommerziell | ≈ 700 | 35+ Mio. Testkilometer, davon 2+ Mio. ohne Sicherheitsfahrer | Kommerzieller Fahrdienst <u>ohne Sicherheitsfahrer</u> in Phoenix und San Francisco |
| | Cruise ¹ (GM) | 12 Städte (inkl. Testgebiete), davon 3 kommerziell | ≈ 300 | 4+ Mio. km ohne Sicherheitsfahrer; 10.000 Fahrten pro Woche | Kommerzieller Fahrdienst <u>ohne Sicherheitsfahrer</u> in Austin, Phoenix und San Francisco über Nacht |
| F A S T F O L L O W E R | AutoX | 10 Operation Areas, davon 2 kommerziell | ≈ 1.000 | n/a | Kommerzieller Fahrdienst <u>ohne Sicherheitsfahrer</u> in Shanghai und Shenzhen |
| | Pony.ai | 6 Städte (inkl. Testzonen), davon 3 kommerziell | ≈ 200 | 24+ Mio. Testkilometer, davon 1 Mio. fahrerlos; 200+ Tsd. zahlungspflichtige Bestellungen | Kommerzieller Fahrdienst <u>ohne Sicherheitsfahrer</u> in Guangzhou, Peking und Shenzhen |
| | WeRide | 25 Städte in 5 Ländern (inkl. Testgebiete), davon 5 inkl. Fahrgastbeförderung | ≈ 500 ² | 20+ Mio. Testkilometer, davon 1 Mio. kommerziell | Fahrten teilweise ohne Sicherheitsfahrer; Autonomes Shuttle mit bis zu 40 km/h |
| | Mobileye (Intel) | Tests in 10 Städten in 6 Ländern auf 3 Kontinenten | n/a | n/a | Umfangreiches Testprogramm, zudem „Supplier of Choice“ für zahlreiche OEMs |
| F O L L O W E R | Motional (Hyundai/Aptiv) | Tests in 7 Städten in zwei Ländern; Personenbeförderung in Las Vegas | n/a | 2+ Mio. Testkilometer; 125.000+ Fahrten seit 2018 | Beförderung inkl. Sicherheitsfahrer; keine eigene Mobilitätsplattform |
| | DiDi Chuxing | 4 Städte (inkl. Testzonen), davon 1 kommerziell (Guangzhou) | ≈ 200 | n/a | Kommerzieller Fahrdienst mit Sicherheitsfahrer in Guangzhou, ansonsten fahrerlose Testfahrten |
| | Moia/VWN (VW Group) | Tests in zwei Städten: München (DE) und Austin (USA) | ≈ 20 | n/a | Nicht kommerzieller Fahrdienst mit Fokus Ridepooling, inkl. Sicherheitsfahrer |

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Bratzel, S. et al. (2023), S. 69 | Stand: September 2023 |

¹Nach einem schweren Unfall wurde Cruise im Oktober 2023 die Robotaxi-Lizenz entzogen, zudem wurden alle Dienste der Marke bis auf Weiteres eingestellt ²darunter auch Robobus, Robovan, Robosweeper

Weitere Anwendungsfälle wie z.B. on-Demand Roboshuttles oder autonome Linienbusse haben bislang eine nischenhafte Bedeutung. Einzelne Anbieter, darunter WeRide aus China, Beep und May Mobility aus den USA oder Transdev, ZF und ioki (DB) aus Europa, gehören zu den wenigen Ausnahmen, die bereits im Regelbetrieb Passagiere an ausgewählten Standorten befördern (allerdings nicht vollständig kommerziell). Für die kommenden Jahre ist jedoch eine verstärkte Dynamisierung zu erwarten. Zahlreiche Akteure, darunter auch die GM-Tochter Cruise (Detroit Free Press 2023), haben den kommerziellen Einsatz von Ridepooling-Fahrzeugen angekündigt. Im Shuttle-Markt aktive Unternehmen planen einen massiven Ausbau ihrer autonomen Fahrzeugflotten (z.B. mehrere Tausend ZF-Shuttles in Kooperation mit Beep) (ZF 2023). Strategy& geht davon aus, dass ab dem Jahr 2035 weltweit mehr als 2 Mio. Robotaxis p.a. verkauft werden (strategy& 2022).

Auch für die Straßenmobilität in Europa, die bislang nur durch wenige Pilotprojekte mit geringen Geschwindigkeiten auf festen Streckenabschnitten und mit Sicherheitsfahrer gekennzeichnet ist, wird ein massiver Anstieg autonomer Sharing-Dienstleistungen erwartet. Mit der Verabschiedung eines Rechtsrahmens für den regulären Einsatz von autonomen Fahrzeugen im Linienverkehr haben Deutschland und Frankreich bereits erste wichtige Schritte eingeleitet (ioko 2023). Seit Mai 2023 betreibt das britische Busunternehmen Stagecoach auf einer 22 km langen Strecke in der Region Edinburgh fünf autonome Linienbusse, die halbstündlich verfügbar und erstmals mit Geschwindigkeiten von bis zu 80 km/h unterwegs sind (mit Sicherheitsfahrer) (Stagecoach 2023). Das deutsche Pilotprojekt in der Region Darmstadt/Offenbach erlitt hingegen einen Rückschlag. Nachdem die Technologiefirma Mobileye die notwendige Zulassung für ihr AVF-System beim KBA auf unbestimmte Zeit verschob, ist das Vorhaben fortan pausiert (Delhaes 2023). MAN Truck & Bus plant nun gemeinsam mit Mobileye den Pilotbetrieb eines ersten autonomen Linienbusses in München ab dem Jahr 2025 (MAN 2023). Ein Jahr später soll erstmals in Europa ein kommerzieller autonomer Ridepooling-Dienst, bereitgestellt durch die VW-Tochter Moia in Kooperation mit Mobileye, in Hamburg an den Start gehen.

Die Ausgangslage in der Güterlogistik ist eine Ähnliche. Zwar zählen fahrerlose Transportsysteme innerhalb von Produktionsstätten bereits seit einigen Jahren zum Geschäftsalltag einiger Betriebe, allerdings bleibt eine flächendeckende Expansion außerhalb der Werksgrenzen bislang aus. Vielerorts finden Erprobungen und Pilotprojekte statt, um die technische Reife von AVF-Systemen voranzutreiben. In den USA, wo etwa zwei Drittel aller Güter mit Lkw transportiert werden (bts.gov 2023), sind insgesamt die größten Anstrengungen zu beobachten. Das 2017 gegründete Start-up Gatik zählt beispielsweise mit seiner kommerziellen Flotte in den Bundesstaaten Arkansas und Texas sowie der kanadischen Provinz Ontario zu den führenden Anbietern auf der Kurzstrecke und hat seit 2019 mehr als eine halbe Million Auslieferungen (u.a. für Walmart) durchgeführt (businesswire.com 2021), (businesswire.com 2023). Akteure wie Aurora, Embark oder Torc (Daimler Trucks) fokussieren sich hingegen auf den Hub-to-Hub Einsatz im Fernverkehr (vgl. Kap. 2.3) (Aurora 2023), (Gilroy 2022) und kündigen erste kommerzielle Routen in den kommenden Jahren an.

Aber auch andere Länder steigern ihre Bemühungen beim autonomen Warentransport. In China gab beispielsweise das Start-up Pony.ai, bislang ausschließlich im Robotaxi-Geschäft tätig, eine Kooperation mit dem Logistikdienstleister Sinotrans und dem OEM Sany Group bekannt. Bereits im November 2022 rollten die ersten 30 autonomen Schwerlast-Lkw für den Testbetrieb vom Band (chinadaily.com.cn 2022). In Japan führt das Unternehmen TuSimple auf dem New Tomei Expressway, der die Städte Tokio, Nagoya und Osaka verbindet, seit Juni 2023 Testfahrten durch (Bellan 2023a). Zu den wohl prominentesten Testprojekten in Deutschland zählt ATLAS-L4. Während der Laufzeit zwischen Januar 2022 und September 2024 erarbeiten die Kooperationspartner MAN Truck & Bus, Knorr-Bremse, Leoni und Bosch einen ganzheitlichen Ansatz für den

Betrieb autonomer Lkw auf öffentlichen Autobahnen und Schnellstraßen. Mithilfe der Erkenntnisse sollen kommerzielle Routen bis 2025 möglich sein (ATLAS-L4 2022).

Obwohl eine breite Kommerzialisierung von autonomen Fahrsystemen aus (End-)Kundenperspektive bislang noch aussteht, sind die vorgelagerten Entwicklungs-, Erprobungs- und Implementierungstätigkeiten bereits mehrheitlich im Gange. In einer internationalen Gesamtbetrachtung ergibt sich in Abhängigkeit des betrachteten Wertschöpfungsfeldes ein vielschichtiges Akteursnetzwerk, das sowohl Speziallösungen für Teilbereiche als auch Gesamtsysteme bereitstellt. Dabei unternimmt folgende Tabelle auf Basis öffentlich verfügbarer Informationen einen Vergleich der Kompetenzen deutscher Akteure mit dem relevanten internationalen Wettbewerbsumfeld (vgl. Tabelle 3).

Tabelle 3: Kompetenzverteilung deutscher und internationaler Akteure in den Wertschöpfungsfeldern des autonomen und vernetzten Fahrens (Auswahl)

| Wertschöpfungsfeld | Kompetenzbereiche | Kompetenzen deutscher Akteure | Kompetenzen internationaler Akteure |
|--------------------------|--|--|---|
| Autonomes Fahrsystem | Hardwarekomponenten (z.B. Sensorik, Aktuatorik, Zentralechner) | Moderat-hoch (z.B. Bosch, Continental, ZF, Infineon, Vector, ...) | Hoch-sehr hoch (z.B. Nvidia, Qualcomm, Mobileye, Valeo, Luminar, ...) |
| | Software/Daten (z.B. Betriebssystem, Fahrschlauch) | Moderat-hoch (z.B. Bosch, Continental, ZF, Infineon, Vector, ...) | Sehr hoch (z.B. Nvidia, Qualcomm, Blackberry, Mobileye, ...) |
| | Gesamtsystemintegration | Gering-moderat (z.B. Bosch, Continental, ZF, BMW, Mercedes, ...) | Sehr hoch (z.B. Alphabet/Waymo, GM/Cruise, Baidu, Motional, Mobileye) |
| Mobilitätsplattform | Hardware/Software/Daten (z.B. Kunden, Nutzungsmuster, Matching) | Moderat (z.B. FreeNow (BMW/MB), DB, Öff. Verkehrsbetr., ...) | Sehr hoch (z.B. Baidu, Alphabet/Google, Uber, Didi Chuxing, Via, ...) |
| | Betrieb des AVF-Services (z.B. Supervision, Flottenmanagement) | Moderat (z.B. Vay, Ferrride, Moia, DB, Sixt, Miles, ...) | Hoch (z.B. Baidu, Alphabet/Waymo, GM/Cruise, Ottopia, DriveU, ...) |
| Fahrzeuherstellung | Plattform, AVF-Produktion, AVF-Integration, Montage, ... | Hoch-sehr hoch (z.B. Volkswagen, Holon/Benteler, ZF, Schaeffler) | Hoch-sehr hoch (z.B. Baidu, Alphabet/Waymo, GM/Cruise, EasyMile, Zeekr, ...) |
| Flotten-dienstleistungen | Reinigung, Wartung, Reparatur, Ersatzteile, ... | Moderat-hoch (z.B. Bosch, Continental, ZF, Autohandelsgruppen) | Moderat-hoch (z.B. Element, Leaseplan/ALD Automotive, Holman, Wheels, ...) |
| Content & Services | Entertainment, Mobile Office, Werbung, Logistikdienstleistungen, ... | Gering-moderat (z.B. 4 screen, BMW, Dachser, Schenker (DB), ...) | Sehr hoch (z.B. Google Services, WeChat/Tencent, Microsoft, Amazon, ...) |
| Infrastruktur | Kartendaten, Roadside Units, Mobilfunknetz, Datenintegration, ... | Moderat (z.B. Telekom, Bosch, PTV, Volkswagen Components) | Moderat-hoch (z.B. Google Maps, Baidu Maps, TomTom, AT&T, Denso, ...) |

Quelle: Eigene Darstellung

Demnach besitzen deutsche Unternehmen in wichtigen Teilbereichen zentraler Wertschöpfungsfelder des Autonomen Fahrens hohe bis sehr hohe Kompetenzen. Beispielsweise zählen Tier-1-Zulieferer wie Bosch, Continental oder ZF als auch vereinzelte lokale „Hidden Champions“ des Mittelstands (z.B. Vector) mit ihrem umfangreichen Knowhow bei Sensorik, Aktuatorik, Software und Daten zu nachgefragten Kooperationspartnern bei der Entwicklung autonomer Fahrsysteme. Allerdings hat sich der internationale Wettbewerb innerhalb kurzer Zeit deutlich intensiviert. So etablieren sich einst branchenfremde Akteure wie Nvidia oder Qualcomm mit ihren System-on-Chip-Lösungen (SoC) als neue Wunschlieferanten sowie Entwicklungspartner traditioneller OEMs und Newcomer und sichern sich damit milliardenschwere Aufträge (Kani 2022), (Qualcomm 2022). Auch weitere Unternehmen wie Mobileye, Horizon Robotics oder Luminar entwickeln sich aufgrund ihrer einzigartigen Expertise zu unumgänglichen Kooperationspartnern für Gesamtsystem- und Gesamtfahrzeuhersteller. Exemplarisch für die Marktdominanz neuer Akteure steht der Nvidia DRIVE Hochleistungscomputer, der von zahlreichen Automobilakteuren (u.a. BYD, Hyundai, Mercedes-Benz, Geely) und Robotaxi-Anbietern (u.a. Cruise, Didi Chuxing, AutoX) eingesetzt wird.

Hinzu kommt, dass die Entwicklung autonomer Gesamtsysteme bislang größtenteils außerhalb Deutschlands stattfindet. Vor allem US-amerikanische und chinesische Anbieter besitzen hierbei einen bedeutenden Erfahrungsschatz und Kompetenzvorsprung. So bietet Waymo sein als „Waymo Driver“ bezeichnetes Level-4-Fahrsystem mittlerweile in der fünften Generation an (Waymo 2022) und legte bis Februar 2021 mehr als 20 Mio. Meilen (32 Mio. km) autonom auf öffentlichen Straßen zurück (Waymo 2021). Zwei Jahre später (Februar 2023) erreichte das Unternehmen nahezu zeitgleich mit seinem US-Konkurrenten Cruise (GM) erstmals 1 Mio. zurückgelegte Meilen (1,7 Mio. km) ohne Sicherheitsfahrer. In China legte der führende Anbieter Apollo (Baidu) nach

eigenen Angaben bis Juni 2023 mehr als 60 Mio. km (inkl. Testfahrten) zurück (apollo.auto 2023). Auch Motional (Hyundai/Aptiv), Pony.ai, WeRide und AutoX berichten regelmäßig über ihre Lernkurven und Fortschritte. Die insgesamt steigende Datenbasis dieser Anbieter verbessert deren Systemsicherheit und -qualität, erschwert jedoch aus deutscher Sicht einen zeitlich und finanziell tragbaren Aufholprozess.

Auch beim Betrieb autonomer Mobilitätsdienstleistungen mischen vor allem US-amerikanische und chinesische Akteure vorne mit. So wickelte Apollo (Baidu) nach eigenen Angaben bereits mehr als 3 Mio. kommerzielle Fahrten mit seinen Robotaxis ab, davon allein mehr als 700 Tsd. im 2. Quartal des Jahres 2023 (Baidu 2023). Allerdings besitzen in Deutschland sowohl zahlreiche öffentliche Verkehrsbetriebe als auch einige Anbieter von multi- und intermodalen Mobilitätsplattformen (z.B. FreeNow, BVG Jelbi, HVV switch) relevante Kompetenzen. Diese könnten sich perspektivisch in Richtung autonomer Services öffnen. Kooperationen zwischen Motional (Hyundai/Aptiv) mit den Vermittlungsplattformen Uber, Lyft und Via (Motional 2023) sowie die Partnerschaft zwischen Waymo und Uber (uber.com 2023) bestätigen die These, dass die Entwicklung und der Betrieb autonomer Fahrzeugflotten nicht zwangsläufig aus einer Hand erfolgen müssen. Vielmehr bilden sich partnerschaftliche und datenbasierte Service-Ökosysteme, in denen jeder Akteur seine eigenen Stärken einbringt. Hiervon können auch deutsche Betriebe profitieren.

Von den übrigen Wertschöpfungsfeldern haben deutsche Akteure insbesondere bei der Entwicklung von autonomen Fahrzeugplattformen und der Herstellung autonomer Fahrzeuge die höchsten Kompetenzen vorzuweisen. Die Expertise im Bereich der Industrialisierung von Gesamtsystemen und -fahrzeugen durch Tier-1-Zulieferer und OEMs kommt hierbei positiv zum Tragen. Umso überraschender erscheint es, dass mit VW Nutzfahrzeuge, ZF und Holon (Benteler) nur eine Handvoll deutscher Unternehmen merkliche Anstrengungen bei der Entwicklung und dem Vertrieb autonomer Plattformen und Spezialfahrzeuge unternimmt. Ebenfalls moderate bis hohe Kompetenzen besitzen die inländischen Betriebe bei der Bereitstellung zusätzlicher Flottendienstleistungen. Diese verteilen sich jedoch mehrheitlich auf die Zulieferer sowie den Automobilhandel mit seinem starken Aftermarket-Geschäft. Deutlich unterrepräsentiert sind deutsche Unternehmen bei sonstigen Mehrwertdiensten. Diese liegen mehrheitlich in der Hand ausländischer Unternehmen, wobei das Münchener Start-up 4.screen eine der wenigen positiven Ausnahmen bildet.

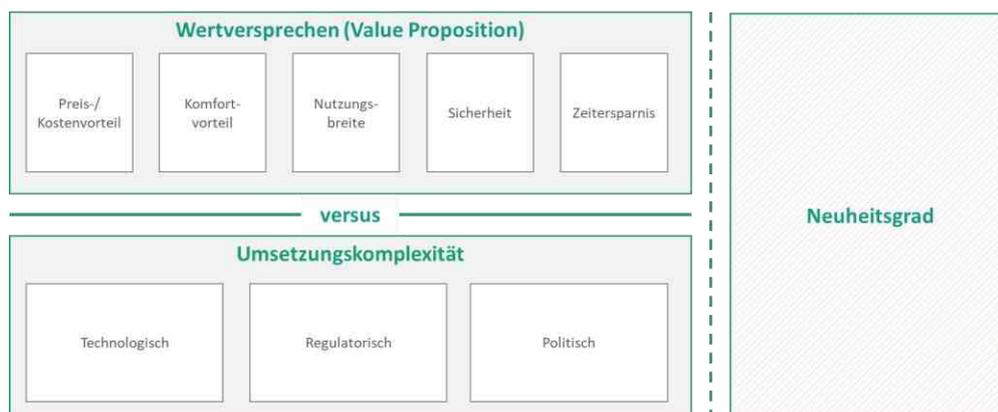
Die Bereitstellung von Infrastruktur (z.B. vernetzte Verkehrsschilder, Roadside Units) als Enabler des automatisierten und vernetzten Fahrens kann insgesamt als bedeutsam eingeordnet werden, wengleich regionale Unterschiede hinsichtlich der Umsetzungskonsequenz bestehen. In den USA erfolgt die Erprobung autonomer Fahrsysteme weitestgehend auf Basis hochauflösender Kartendaten und Verkehrsinformationen, wird jedoch nicht um infrastrukturbasierte Quellen (z.B. V2V-Gefahrenmeldung) angereichert. Im Gegensatz dazu priorisiert die chinesische Regierung im Rahmen ihres Fünf-Jahres-Plans den Ausbau intelligenter und vernetzter (Verkehrs-)Ökosysteme und unternimmt enorme Infrastrukturinvestitionen (GIZ 2022). So werden Straßenzüge, Brücken und Tunnel in speziell ausgewiesenen autonomen Testzonen mit umfangreichen Kommunikations-, Überwachungs- und Verkehrsleitsystemen ausgestattet. Der Ausbau hierzulande nimmt ebenfalls Fahrt auf, wird jedoch durch einen Systemstreit der Hersteller bezüglich der „richtigen“ Übertragungstechnologie (pWLAN oder Mobilfunk) ausgebremst (Vogel 2023). Deutsche Dateninfrastruktur- und Telekommunikationsunternehmen haben jedoch eine gute Ausgangsposition, zumindest in Europa wesentliche Wertschöpfungsbeiträge beim Auf- und Ausbau von V2X-Infrastruktur zu erzielen. International sehen sie sich jedoch dominanten Big Data Akteuren (z.B. Baidu, Google, TomTom) konfrontiert.

Insgesamt zeigt sich, dass Deutschland als Standort und deutsche Akteure beim automatisierten Fahren bis einschließlich Level 3 durchaus als Innovationstreiber bezeichnet werden können. Abseits des Ownership-Betriebsmodells ergeben sich jedoch insbesondere bei höheren Autonomiegraden erhebliche Rückstände und Kompetenzdefizite. Nicht nur hat Deutschland im Vergleich zu Ländern wie den USA oder China noch keine kommerziellen autonomen Fahrdienste auf der Straße, es besitzt ebenso nennenswerte Angebotslücken und Wissensrückstände in wichtigen Wertschöpfungsbereichen.

2.3 Relevante Anwendungsfälle für den Innovationsstandort Deutschland

Angesichts der herausfordernden Ausgangslage des deutschen Innovationsstandorts erscheint eine Fokussierung auf wenige, aber möglichst vielversprechende Anwendungsfälle empfehlenswert. Zur Identifikation derartiger Einsatzmöglichkeiten von AVF-Systemen wurde ein mehrstufiges, qualitatives Bewertungsmodell entwickelt und mithilfe von Experteneinschätzungen validiert. Es untersucht die zuvor genannten Anwendungsfälle hinsichtlich ihres Wertversprechens (Value Proposition), der erwarteten Umsetzungskomplexität sowie des relativen Neuheitsgrades (vgl. Abbildung 5) (Osterwalder 2011), (Prahalad und Hamel 2006), (Bratzel und Teller mann 2023). Dabei wird davon ausgegangen, dass nur eine Kombination dieser drei Einflussfaktoren eine hinreichende skalierungsfähige Kommerzialisierung von AVF-Geschäftsmodellen und die Positionierung als Innovationsstandort ermöglicht. Überspringt die Value Proposition nicht die minimale Nutzenschwelle der Kundengruppen, scheitert der Anwendungsfall an der Nachfrage. Sind die Umsetzungshürden zu groß, gibt es entweder kein oder ein stark verspätetes Angebot. Ebenso kann es nicht der Anspruch eines Innovationsstandorts sein, Anwendungsfälle, die bereits seit mehreren Jahren in anderen Teilen der Welt erfolgreich erprobt und kommerzialisiert werden, lediglich nachzuahmen. Vielmehr müssen Einsatzszenarien gefunden werden, die die eigene Ausgangssituation und eigenen Stärken ausreichend berücksichtigen und darauf basierend innovative Lösungen hervorbringen.

Abbildung 5: Erfolgsfaktoren für die produktive Skalierung von Anwendungsfällen



Quelle: Eigene Darstellung

Vor diesem Hintergrund analysiert die Bewertungsdimension „Value Proposition“ die erwartbare positive Veränderung des Status Quo durch den Einsatz von AVF-Systemen und schätzt den dadurch entstehenden zusätzlichen Kundennutzen ab. Dieser kann sowohl Vorteile für Endkunden als auch für Unternehmen, öffentliche Betriebe oder die Gesellschaft beinhalten. Er ergibt sich aus den Faktoren Preis-/Kostenvorteil, Komfortgewinn, Nutzungsbreite/Anwendbarkeit, Sicherheitsgewinn sowie Zeitersparnis. Im Gegensatz dazu unternimmt der Bereich „Umsetzungskomplexität“ initiale Bewertun-

gen, inwiefern technologische, regulative oder politische Herausforderungen einem breiten kommerziellen Betrieb noch im Wege stehen (vgl. Kapitel 3). Die Dimension „Neuheitsgrad“ bezieht bisherige kommerzielle Angebote sowie deren Vorstufen (z.B. Level 2+ als Vorstufe zu Level 3) ein und untersucht, wie groß der internationale Neuheitswert der jeweiligen Anwendungsfälle aus deutscher Perspektive sein könnte. Hierfür wird auch der Entwicklungsstand und die Relevanz deutscher Akteure in den wesentlichen Wertschöpfungsfeldern einbezogen.

Neben den vorrangig berücksichtigten Dimensionen gibt es weitere Faktoren, die prinzipiell Einfluss auf die Gesamtbewertung der Anwendungsfälle ausüben. Beispielhaft hierfür seien die Herausforderungen der individuellen und gesellschaftlichen Akzeptanz sowie die wirtschaftliche Tragfähigkeit von autonomen Fahrzeugen genannt. Allerdings hängen diese übergeordneten Themenstellungen eng mit den Bewertungsdimensionen zusammen. Sobald der individuelle Kundennutzen (und damit die Value Proposition) groß genug ist, steigt auch die Bereitschaft, etwas Neues auszuprobieren. Bei einer positiven Nutzenerfahrung steigert sich automatisch die Akzeptanz. Gleichermaßen erhöht sich die Zahlungs- und Nutzungsbereitschaft für einen Service, wenn dieser einen aus Kundenperspektive substanziellen Mehrwert erzeugt. Damit lassen sich aus Anbieterperspektive die vorgelagerten Entwicklungskosten besser umlegen, wodurch sich die Wirtschaftlichkeit insgesamt verbessert. Das bedeutet jedoch auch: Anwendungen mit einem (noch) geringen Kundenmehrwert müssen entweder technologisch weiterentwickelt, inhaltlich verändert oder auf zusätzliche Einsatzszenarien ausgeweitet werden, um absehbar ökonomisch vertretbar zu sein.

Tabelle 4 fasst die Ergebnisse der Einzelbewertungen ausgewählter Anwendungsfälle zusammen (vgl. Anhang 2 für eine erweiterte Übersicht). Nachfolgend werden vier Anwendungsfälle mit besonders positiven Bilanzen detaillierter vorgestellt:

1) „Advanced“ Autobahn-Pilot Level 3

Zusammenfassung: Ein auf den meisten Autobahnabschnitten verfügbarer Autopilot (Level 3) im Geschwindigkeitsbereich zwischen 0 und 130 km/h bietet einen mittleren bis hohen Kundennutzen bei vergleichsweise moderater Umsetzungs-komplexität. Marktreife Vorstufen (Level 2+) sind zwar bereits verfügbar, dennoch haben deutsche Akteure durch die weltweit einzigartige serienreife Zertifizierung ihrer Level-3-Systeme einen Kompetenzvorsprung.

Value Proposition: Der Mehrwert aus Kundensicht bildet sich hauptsächlich durch einen erhöhten Komfort- sowie Zeitgewinn. So wird das System dank der hohen Geschwindigkeitsabdeckung erstmals auch für längere Strecken praxistauglich. Der Fahrer wird massiv entlastet, da er die Fahraufgabe abgeben kann und nur noch in Ausnahmefällen übernehmen muss. Eine Verkürzung der Reisezeit ist aufgrund der defensiven Fahrweise des Systems eher unwahrscheinlich, dafür kann die Fahrzeit erstmals legal für andere Aktivitäten genutzt werden. Je nach den Vorlieben der Insassen eröffnet dies auch Unternehmen neue Umsatzpotenziale für zusätzliche Dienstleistungen (z.B. Streaming, Mobile Office etc.).

Umsetzungskomplexität: Die erwartete Schwierigkeit bei der Umsetzung dieses Anwendungsfalles liegt (insb. im Vergleich zu innerstädtischen Level 4 Anwendungsfällen) auf einem mittleren Niveau. So gibt es bereits in Deutschland und Frankreich eine eindeutige Gesetzeslage, zudem erleichtern die vorgeschriebene Übernahmbereitschaft und der Betriebsbereich „Autobahn“ die Komplexität. Dennoch liegen die technologischen Hürden bei der Evolution von Level 2 zu Level 3 Systemen auf einem hohen Niveau. Nicht nur muss das System nachweisbar sicherer sein als menschliche Fahrer, auch ergeben sich hohe Risiken bei der Haftung und funktionalen Absicherung aus Sicht der Hersteller (insb. bei sogenannten Edge Cases, d.h. nicht erwartbaren Sondersituationen) (Prawitz 2023).

Neuheitsgrad: Die Neuartigkeit des Autobahn-Piloten liegt eher in einem mittleren Bereich. So gibt es bereits heutzutage serienreife Autobahnpielen mit automati-

schem Spurwechsel und Abstandshalter, die Langstreckenfahrten spürbar erleichtern. Aktuell vorrangig in den USA verfügbare Level 2+ Systeme verzichten sogar auf die regelmäßige Aufforderung eines Lenkeingriffs, wenngleich die Verantwortung beim Fahren bleibt. Die Neuerung der Level-3-Systeme bezieht sich hauptsächlich auf den Entfall der Fahraufgabe und verändert dadurch die Gestaltung der Reisezeit maßgeblich. Die deutschen Automobilhersteller Mercedes-Benz und BMW haben mit ihren zertifizierten Staupiloten (Level 3) erste wesentliche Grundlagen für spätere Ausbaustufen gelegt und nehmen daher eine international führende Rolle ein.

2) „Advanced“ Parkpilot (Automated Valet Parking, AVP) Level 4

Zusammenfassung: Die breite Einführung eines autonomen Parkpiloten in vielen Parkhäusern unterschiedlicher Betreiber erzeugt aus Kundenperspektive einen mittleren bis hohen Zusatznutzen bei einem gleichzeitig moderaten Umsetzungsaufwand. Starke inländische Akteure mit marktfähigen Lösungen (Mercedes-Benz, Bosch und APCOA in Stuttgart) treiben zudem den internationalen Neuheitsgrad aus deutscher Sicht auf ein hohes Niveau.

Value Proposition: Der erhöhte Zusatznutzen im Vergleich zum Status Quo ergibt sich im Wesentlichen durch einen mittleren Komfort- und Sicherheitsgewinn sowie durch breite Anwendungsmöglichkeiten. Von vielen Menschen als lästig empfundene Aufgaben wie die Parkplatzsuche (Inrix 2017) oder Ein- bzw. Ausparkvorgänge entfallen in kooperierenden Parkhäusern vollständig. Zudem könnte sich das persönliche Sicherheitsempfinden verschiedener Bevölkerungsgruppen (z.B. Frauen, Kinder) spürbar verbessern (MINDACT 2022), (heidelberg.de 1993). Aus Betreiberperspektive lässt sich die vorhandene Parkfläche dichter und effizienter bewirtschaften, obwohl spezielle Parkebenen inkl. Drop-Off- und Pick-up-Zonen vorgehalten werden müssen.

Umsetzungskomplexität: Die zu erwartenden Hürden liegen im Use-Case-Vergleich auf einem mittleren Niveau. Technologisch lassen sich zwei unterschiedliche Ansätze identifizieren (NTT DATA 2022). Variante a) fokussiert sich auf das intelligente Fahrzeug, das – ausgestattet mit diverser Hard- und Software – eigenständig im Parkhaus manövriert (z.B. BMW mit Valeo) (BMW 2023). Variante b) nutzt hingegen eine intelligente Infrastruktur im Parkhaus, mit der Fahrzeuge zu ihren Parkplätzen gelotst werden (z.B. Mercedes-Benz mit Bosch) (Bosch 2023). Nicht nur bringen beide Ansätze eigene technische Herausforderungen mit sich, auch aus regulatorischer Perspektive könnten Eingriffe bei einer zunehmenden Systemvielfalt notwendig werden. Andernfalls droht ein Geflecht aus marken- und systemgebundenen Partnerschaften, welches eine skalierbare und unkomplizierte Anwendung verhindert.

Neuheitsgrad: Bislang sind keine breiten Serienanwendungen von autonomen Parksyste men (Level 4) bekannt. Die deutschen Akteure Mercedes-Benz, Bosch und APCOA bieten – wenn auch nur für einen stark eingeschränkten Nutzerkreis – weltweit erstmals ein marktfähiges AVP-System an. Weitere Hersteller (z.B. Tesla, GreatWall mit Haval oder BAIC mit Arcfox) haben bereits Vorstufen mit verschiedenen Einschränkungen (z.B. Verbleib im Fahrzeug, Fahrzeugüberwachung von außen) im Angebot.

3) „Advanced“ Robobus (Autonomer Linienverkehr) Level 4

Zusammenfassung: Der Einsatz von autonomen Klein- und Omnibussen ohne Sicherheitsfahrer in überwiegend städtischen Gebieten bis 50 km/h führt für Endkunden zu einem mittleren und für Betreiber zu einem hohen Zusatznutzen. Dagegen pendelt sich der voraussichtliche Realisierungsaufwand aufgrund infrastruktureller Maßnahmen auf ein vergleichsweise moderates Niveau ein, wenngleich es auch noch rechtliche Hürden gibt. Der erwartete Neuheitsgrad liegt im hohen bis sehr hohen Bereich. Zudem profitieren Europa und speziell Deutschland von einem verhältnismäßig stark nachgefragten Öffentlichen Personen(nah-)verkehr.

Value Proposition: Der größte Mehrwert ergibt sich für Busunternehmen und öffentliche Verkehrsbetriebe, die derzeit von einem gravierenden Fahrermangel sowie hohen variablen Betriebskosten betroffen sind (Marquardt 2023).¹ Zwar benötigen auch autonome Linienbusse weiterhin Fahrpersonal, allerdings kann dieses aus einem speziellen Operation Center heraus mehrere Fahrzeuge gleichzeitig beaufsichtigen. Zudem profitieren Fahrgäste von potenziell besseren Taktzeiten und niedrigeren Fahrpreisen. Die Unfallsicherheit verbessert sich spürbar, allerdings kann eine geringere Hemmschwelle für Vandalismus oder Belästigungen zu Einbußen bei der persönlichen Sicherheit führen.

Umsetzungskomplexität: Der erwartete technische Realisierungsaufwand liegt dank fester Routenführung sowie nach Möglichkeit getrennten Fahrspuren auf einem eher mittleren Niveau. Die Überquerung von Kreuzungen sowie Bewältigung von Mischverkehr-Situationen stellen jedoch hohe Anforderungen an das AVF-System und können nur teilweise durch mit Lichtsignalanlagen ausgestattete Kreuzungen ausgeglichen werden. Als ebenso herausfordernd wird die Bereitstellung von zusätzlicher Infrastruktur (z.B. durch Reduzierung anderer Fahrstreifen) sowie die Anpassung des Rechtsrahmens (z.B. BOKraft) angesehen (Bitkom 2023a).

Neuheitsgrad: Ein breiter Einsatz von autonomen Linienverkehren ist bislang international kaum erkennbar. Zwar gibt es an verschiedenen Standorten bereits (bemannte) Erprobungsfahrten, allerdings unterliegen diese noch immer zahlreichen Einschränkungen (z.B. wenige Fahrzeuge, kurze Routen, niedrige Geschwindigkeiten). Das britische Pilotprojekt von Stagecoach (vgl. Kap. 2.2) bildet hier eine Ausnahme, jedoch unterscheidet es sich auch durch seine Streckencharakteristik von innerstädtischen Anwendungsfällen. Öffentliche Verkehrsbetriebe aus deutschen Großstädten und Metropolregionen (z.B. BVG, HVV, MVG, KVB etc.) haben bereits eigene Pilotprojekte durchgeführt und besitzen hohe Kompetenzen im Betrieb von großen Fahrzeugflotten.

4) Hub-to-Hub Pilot (Langstreckenlogistik) Level 4

Zusammenfassung: Der autonome Warentransport im Fernverkehr zwischen an Schnellstraßen angebundene Logistikzentren verspricht insgesamt einen hohen bis sehr hohen Zusatznutzen. Dem gegenüber steht jedoch auch ein erhöhter Umsetzungsaufwand, der insbesondere technologische Hürden beinhaltet. Der Neuheitsgrad liegt im hohen Bereich, da bislang nur Ankündigungen einzelner Akteure bezüglich des kommerziellen Einsatzes vorliegen. Deutschland hat zudem noch die Chance, mit seinen heimischen Akteuren eine Vorreiterrolle einzunehmen.

Value Proposition: Die Umstellung auf ein Hub-to-Hub Modell im Fernverkehr bringt spürbare Vorteile für verschiedene Interessensgruppen, darunter vor allem Speditionen und Berufskraftfahrer. Logistikdienstleister profitieren von höheren Betriebszeiten ihrer Fahrzeuge, weniger Unfallschäden sowie stark verringerten operativen Kosten und begegnen gleichzeitig dem akuten Fahrermangel. Arbeitnehmer übernehmen nur noch die „First Mile“ und „Last Mile“ zu bzw. von den Verteilzentren („Hubs“) sowie die Überwachung auf den Autobahnen und haben damit erstmals einen lokal gebundenen Arbeitsplatz (Collie et al. 2022), (Uber Freight 2021), (berylls 2022a).

Umsetzungskomplexität: Die größten Herausforderungen liegen u.a. in der Entwicklung und rechtskonformen Homologation des AVF-Systems. Hinzu kommt der ggf. notwendige Aufbau und Betrieb zusätzlicher Hub-Infrastruktur sowie die Abwicklung der Wege zwischen Autobahn und Hub. Regulatorisch und politisch lie-

¹ Laut dem Branchenverband BDO fehlen derzeit bereits rund 7.800 Busfahrende, bis zum Jahr 2030 sollen es nach aktuellen Schätzungen rund 87.000 sein, vgl. (bdo 2023)

gen die Hürden eher im mittleren Bereich. Insbesondere in Deutschland ist die Rechtslage weitgehend eindeutig und unproblematisch.

Neuheitsgrad: Kommerzielle Hub-to-Hub-Lösungen haben einen hohen Neuheitswert. An verschiedenen Standorten (z.B. USA, Deutschland, China) finden Erprobungsfahrten und Pilotprojekte statt, allerdings ist bislang keinem Akteur ein Regelbetrieb im Fernverkehr gelungen. Deutsche Unternehmen besitzen relevante Kompetenzen in den Wertschöpfungsfeldern und könnten zu den ersten Anwendern von autonomen Lkw im Hub-to-Hub-Betrieb zählen.

Analyse des Status Quo

Insgesamt stellen die soeben präsentierten Anwendungsfälle aus Sicht der Autoren lukrative Startpunkte für eine angestrebte produktive Skalierung von autonomen Fahrsystemen in Deutschland bzw. durch deutsche Akteure dar. Ihnen gemein ist die Eigenschaft, ein vergleichsweise attraktives Verhältnis zwischen erforderlichen Anstrengungen (Input) und erwartbaren Mehrwerten (Output) zu besitzen. Zudem zeichnen sie sich durch eine überwiegend starke Position Deutschlands und deutscher Akteure aus, sodass deren Stärken gebührend berücksichtigt werden. Es ist darauf hinzuweisen, dass die vorgeschlagenen Anwendungsfälle keinesfalls als ausschließlich und unerschöpflich anzusehen sind. Vielmehr liegt die Intention darin, auf Basis einer qualitativen Bewertung der erwarteten Aufwand-Nutzen-Relation und mit Blick auf eine produktive Skalierung vielversprechende Einsatzmöglichkeiten von AVF-Systemen mit hohem deutschen Wertschöpfungsbeitrag zu identifizieren. Im weiteren Verlauf wird deshalb insbesondere bei der detaillierten Ausarbeitung bestehender Herausforderungen und der Ableitung möglicher Handlungsfelder auf diese Anwendungsfälle eingegangen.

Tabelle 4: Bewertungsmatrix zur Identifikation von Fokus-Anwendungsfällen für den Innovationsstandort Deutschland

Analysis des Status Quo

| Anwendungsfall | Betriebsbedingungen (ODD) | Value Proposition | Umsetzungs-komplexität | Neuheitsgrad | Gesamtbewertung |
|-----------------------------------|---|-------------------|------------------------|------------------|--|
| Staupilot (Level 3) | Stausituationen; meiste Autobahnen bis 60 km/h; Übernahmebereitschaft; keine Tunnel; kein Extremwetter | Gering | Gering | Gering | Geringer Zusatznutzen bei überschaubarem Aufwand, allerdings auch geringer Neuheitsgrad |
| Autobahnpiilot (Level 3) | Meiste Autobahnen bis 130 km/h; Übernahmebereitschaft; keine Tunnel; kein Extremwetter | Mittel - Hoch | Mittel | Mittel | Erhöhter Nutzen zu erhöhten Zusatzkosten, allerdings nur moderater Neuheitsgrad |
| „Advanced“ Parkpilot (Level 4) | Viele Parkhäuser mehrerer Betreiber bis 10 km/h; freie Parkebene; Drop-Off- und Pick-Up-Zonen | Mittel - Hoch | Mittel | Hoch | Erhöhter Zusatznutzen bei überschaubarem Aufwand, zudem hoher Neuheitsgrad (aus dt. Sicht) |
| „Advanced“ Robotaxi (Level 4) | On-Demand Taxi-Service bis 50 km/h ohne Sicherheitsfahrer; flexible Route; städtische Gebiete; Teleoperation | Mittel - Hoch | Hoch - Sehr hoch | Gering | Hoher Zusatznutzen bei deutlich erhöhtem Umsetzungsaufwand, zudem sehr geringer Neuheitsgrad |
| „Advanced“ Robobus (Level 4) | Linienverkehr bis 50 km/h ohne Sicherheitsfahrer; feste Route; städtische Gebiete; getr. Fahrspur; Teleoperation | Hoch | Mittel | Hoch - Sehr hoch | Hoher Zusatznutzen bei moderatem Umsetzungsaufwand, zudem sehr hoher Neuheitsgrad erwartet |
| „Zubringer“ Roboshuttle (Level 4) | On-Demand Shuttle-Service bis 80 km/h ohne Sicherheitsfahrer; flexible Route; rurale Gebiete; Teleoperation | Mittel - Hoch | Hoch | Hoch - Sehr hoch | Hoher Zusatznutzen bei erhöhtem Umsetzungsaufwand, zudem hoher bis sehr hoher Neuheitsgrad |
| „Advanced“ Platooning (Level 2/4) | Elektr. Deichsel bis 80 km/h; Lead inkl. Fahrer; max. 2 Trailing-Fahrzeuge; V2V-Kommunikation; versch. Hersteller | Mittel - Hoch | Mittel | Mittel | Erhöhter Mehrwert zu moderatem Realisierungsaufwand, allerdings nur mittlerer Neugigkeitswert |
| Hub-to-Hub Pilot (Level 4) | Meiste Autobahnen bis 80 km/h ohne Sicherheitsfahrer; zwischen Autobahn-Verteilzentren; Teleoperation | Hoch - Sehr hoch | Mittel - Hoch | Hoch | Sehr hoher Nutzen bei leicht erhöhtem Zusatzaufwand, allerdings hoher Neuheitsgrad (aus dt. Sicht) |

Quelle: Eigene Darstellung

3 Herausforderungen hinsichtlich der Skalierbarkeit von AVF-Systemen

Herausforderungen hinsichtlich
der Skalierbarkeit von AVF-
Systemen

Im Folgenden werden Herausforderungen identifiziert, analysiert und priorisiert, die es zum Erreichen der Skalierbarkeit von AVF-Systemen am Innovationsstandort Deutschland zu überwinden gilt. Die identifizierten zentralen Herausforderungen bilden die Grundlage zur Definition der Handlungsempfehlungen in Kapitel 4.

3.1 Methodisches Vorgehen

Zur Identifikation der zentralen Herausforderungen und Herausforderungsfelder kamen vier Quellen zum Einsatz:

1. **Call for Evidence** (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz der Bundesrepublik Deutschland und ifok GmbH 2023): Im Zeitraum vom 10.10. bis 31.11.2022 wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) eine Umfrage unter 44 Personen aus 38 Institutionen (mehrheitlich Mobilitätsverbände, Automobilzulieferer und -hersteller) zur Identifikation von industrie- und wirtschaftspolitisch relevanten Technologie- und Handlungsfeldern des automatisierten und vernetzten Fahrens durchgeführt, mit dem Ziel, Deutschland zum Innovationsstandort für das automatisierte und vernetzte Fahren zu machen. Die Ergebnisse des Call for Evidence wurden in einer Auswertung durch das BMWK zusammengefasst, die unter folgendem Link heruntergeladen werden kann: www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/C-D/call-for-evidence-zukunft-des-automatisierten-und-vernetzten-fahrens.pdf. Die in den Antworten enthaltenen Herausforderungen wurden im Rahmen dieser Studie durch eine Metaanalyse der anonymisierten und randomisierten Antworten der Umfrage gewonnen und bildeten den Ausgangspunkt zur Identifikation von Herausforderungen der Skalierbarkeit von AVF-Systemen.
2. **Umfrage im Rahmen des Workshops zum Automatisierten und Vernetzten Fahren** (Ad-Hoc-Gruppe „Smart Car“ et al. 2023): Am 28. Februar 2023 fand auf Einladung der Ad-Hoc-Gruppe „Smart Car“ des Expertenkreises „Transformation der Automobilwirtschaft“ in den Räumlichkeiten des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV) ein Expertenworkshop zum automatisierten und vernetzten Fahren statt, in dessen Rahmen eine Umfrage der Begleitforschung unter den Experten sowie eine Metaanalyse der diskutierten Themen zur Identifikation von Herausforderungen und Herausforderungsfeldern vorgenommen wurde.
3. **Analyse des Status Quo** (vgl. Kapitel 2): Aus der systematischen Analyse des Status Quo wurden über die Stärken und Schwächen des AVF-Standorts Deutschland spezifische Herausforderungen des Innovationsstandorts Deutschland im nationalen sowie internationalen Vergleich identifiziert.
4. **Experteninterviews** (Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO und Center of Automotive Management (CAM) 2023): Zur Bestätigung, Validierung und Bewertung der identifizierten Herausforderungen wurden abschließend 8 Experteninterviews mit Vertretern aus der Automobilindustrie, Mobilitätswirtschaft sowie öffentlichen Hand durchgeführt.

Die Gesamtheit der Herausforderungen wurde anschließend nach Abstraktionsebenen strukturiert, hierarchisch gegliedert, nochmals durch eine Literaturrecherche bezüglich des Stands der Wissenschaft und Technik validiert und bezüglich ihrer Aktualität gefiltert. Die daraus resultierenden Herausforderungen beschreiben auf unterster Abstraktionsebene feingranulare Hürden, die durch entsprechende Einzelaktivitäten für die Umsetzung oder Skalierung der Anwendungsfälle überwunden werden müssen. Diese Art der Herausforderungen wird im Folgenden auch als atomare Einzelherausforderungen

bezeichnet. Zur weiteren Analyse wurden diese atomaren Einzelherausforderungen thematisch zu 18 Herausforderungsfeldern zusammengefasst (vgl. Abbildung 6 und Abbildung 7). Eine Beschreibung der circa 100 Einzelherausforderungen inklusive deren Zuordnung zu den Herausforderungsfeldern findet sich im Kapitel 3.2.

.....
 Herausforderungen hinsichtlich
 der Skalierbarkeit von AVF-
 Systemen

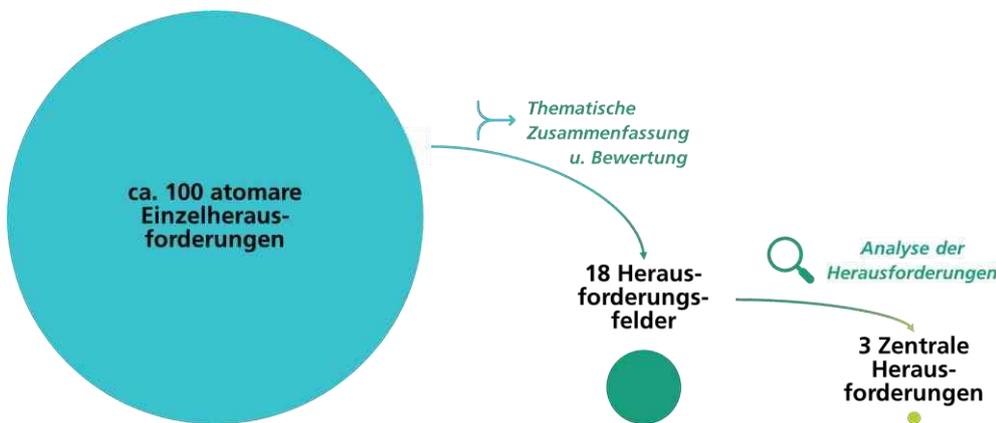
Abbildung 6: Übersicht der Herausforderungsfelder



Quelle: Eigene Darstellung

Für eine Priorisierung der Handlungsfelder im Hinblick auf die Handlungsempfehlungen wurde anschließend untersucht, inwieweit die Einzelherausforderungen der Handlungsfelder eine Skalierbarkeit der AVF-Anwendungsfälle behindern. Dafür wurden die Herausforderungsfelder bezüglich ihrer Auswirkungen auf die AVF-Anwendungsfälle untersucht. Dies erfolgte einerseits aggregiert über alle Anwendungsfälle hinweg sowie separiert für die drei Anwendungsbereiche „Ownership“, „Sharing“ und „Logistics“. Die daraus resultierende Rangliste beschreibt die Relevanz der Lösung einzelner Herausforderungsfelder, um das Zielbild des AVF-Innovationsstandorts Deutschland im Hinblick auf die Skalierbarkeit zu erreichen.

Abbildung 7: Methodisches Vorgehen zur Identifikation relevanter Herausforderungsfelder und zentraler Herausforderungen



Quelle: Eigene Darstellung

Für eine nachhaltige und effiziente Lösung der als relevant identifizierten Herausforderungsfelder müssen allerdings grundlegende Rahmenbedingungen geschaffen werden, die ein selbsttragendes Wertschöpfungsökosystem für ebenjene Lösungserarbeitung etablieren. Hierfür wurden die atomaren Einzelherausforderungen zusätzlich einer Metaanalyse bezüglich ihrer Herausforderungstreiber unterzogen. Dadurch konnten drei

zentrale Herausforderungen identifiziert werden, die für die Schaffung zielführender Rahmenbedingungen durch entsprechende Handlungen überwunden werden müssen (vgl. Abbildung 7).

Herausforderungen hinsichtlich
der Skalierbarkeit von AVF-
Systemen

Im Folgenden werden entsprechend des geschilderten Aufbaus zuerst die Herausforderungsfelder sowie die Erkenntnisse aus der thematischen Zusammenfassung der Einzelherausforderungen dargestellt (vgl. Kapitel 3.2). Zur besseren Verständlichkeit für den Leser werden die Einzelherausforderungen der 18 Handlungsfelder dabei in die vier Bereiche „Technologische und technische Herausforderungen“, „Regulatorische und harmonisierungsbezogene Herausforderungen“, „Wertschöpfung und Wettbewerbsposition“ sowie „Nachfrage und Gesellschaft“ gegliedert (vgl. Abbildung 6). Anschließend werden die Bewertungsergebnisse bezüglich der Relevanz der Handlungsfelder vorgestellt und interpretiert (vgl. Kapitel 3.3). Das Kapitel 3 schließt mit der Metaanalyse der aktivitätshemmenden Einzelherausforderungen und der Ableitung dreier zentralen Herausforderungen (vgl. Kapitel 3.4).

3.2 Herausforderungsbereiche

Der Fortschritt der Automobil- und Mobilitätswirtschaft, die Fahraufgabe von Pkw und Lkw durch einen Computer unterstützen oder sogar ausführen zu lassen, ist in mehrfacher Hinsicht bereits sehr beachtlich. Als Beleg hierfür können etwa der Notbremsassistent oder der Spurhalteassistent oder weitere Beispiele aus Kapitel 2 genannt werden. Des Weiteren wird in zahlreichen Meldungen über erzielte Erfolge bei Tests des automatisierten und vernetzten Fahrens nach entsprechend aufwendigen Vorbereitungen im öffentlichen Raum berichtet (Wilkins 2023b, 2023c; Quanlin 2023; Schaal 2023). Sowohl in mehreren technischen als auch in verschiedenen weiteren Bereichen ist der Entwicklungsstand allerdings noch nicht weit genug ausgereift, dass Fahrzeuge des Personen- oder Gütertransports beliebige Strecken unter beliebigen Bedingungen ohne Beaufsichtigung fehlerfrei und selbstfahrend zurücklegen können. Auf diese Bereiche und ihre Herausforderungen wird nachfolgend näher eingegangen.

3.2.1 Technologische und technische Herausforderungen

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 – der sogenannten Operational Design Domain (ODD) – 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 (vgl. Kapitel 2). Entsprechende technische Herausforderungen scheinen daher bei dieser begrenzten ODD nicht mehr gegeben zu sein. Generell ist zwar mit heute verfügbaren Sensoren bei geeigneten Umweltbedingungen schon eine detaillierte Erfassung der Fahrzeugumgebung möglich, bei bestimmten adversen Wetterlagen wie beispielsweise starkem Regen oder Schneefall liefert sie jedoch teilweise noch keine zuverlässigen Ergebnisse (Zang et al. 2019). So werden beispielsweise von einer optischen Sensorik Regentropfen oder Schneeflocken ebenfalls festgehalten. In Abhängigkeit der genauen technischen Sensorausgestaltung beeinträchtigt dies die prinzipielle Wahrnehmung von Objekten oder die Objekte können – selbst bei prinzipieller Wahrnehmung durch die Sensorik – aufgrund beschränkter Verarbeitungskapazitäten nicht zutreffend oder ausreichend differenziert erfasst werden. Das interessierenden Verkehrsumfelds wird unter Umständen nicht vollständig erkannt. Entsprechend muss bei unbeständigen Bedingungen unterschiedliche Sensorik zur Umfelderkennung zum Einsatz kommen. Dadurch können gegenseitige Unzulänglichkeiten bei adversen Umweltbedingungen ausgleichen werden. Der Einbau unterschiedlicher Sen-

soren erhöht allerdings gleichzeitig die Kosten und den Aufwand, was eine Skalierbarkeit des AVF-Systems aus wirtschaftlichen Gründen wiederum erschwert.

Herausforderungen hinsichtlich
der Skalierbarkeit von AVF-
Systemen

Zusätzlich müssen für alle Level neben der reinen Aufnahme des Umfelds aus den Sensordaten zusätzlich Objekte mit hoher Zuverlässigkeit detektiert werden. Moderne Sensorfusion greift hierzu auf eine Vielzahl integrierter Sensorik Elemente zu. Um die Sensorfusion robuster zu gestalten und gegen fehlerhafte Werte vorzugehen wird diese oft mit KI gestützt (Gao et al. 2023). Technische Herausforderungen ergeben sich hierbei bezüglich der zuverlässigen Erkennung und Verwertung durch Sensorik erkannter Objekte (Vargas et al. 2021). Ein schwieriger zu meisterndes Feld der Erkennung liegt in spezifischen Corner Cases. Corner Cases beschreiben seltene, situationsgebundene Grenz- beziehungsweise Sonderfälle, mit denen die AVF-Systeme konfrontiert werden. Je nach vorliegender ODD bedarf es jedoch auch deren Berücksichtigung. Hierunter fällt beispielsweise die Erkennung von ungewöhnlichen Objekten im Fahrzeugumfeld, wie zum Beispiel verkleidete Personen an Halloween (vgl. (Coldewey 2015)). Dies ist insbesondere im urbanen Raum mit diversen, möglichen Sonderfällen relevant („Offene-Welt-Problematik“). Über diese noch unzureichende Funktion der Sensorik bzw. Auswertung für einen unüberwachten Level-4-Betrieb hinaus ist beim Zusammentreffen mit der Polizei, der Feuerwehr oder einem Rettungsdienst heute noch nicht auszuschließen, dass ein Einsatz durch das Verhalten eines vernetzten, automatisierten Automobils nicht beeinträchtigt wird. Da sich diese Fahrzeuge abweichend von den geltenden Verkehrsregeln verhalten dürfen, induziert dies eine erhöhte Komplexität im korrekten Verhalten der Fahrzeuge. Gleiches gilt für die Erkennung eines ungewöhnlichen Verhaltens von anderen Verkehrsteilnehmern, z. B. betrunkenen Fahrern, älteren Fußgängern oder Fahrradfahrern allgemein. Da die AVF-Systeme hierbei nicht an eine fahrende Person übergeben dürfen, sind die Fälle im Rahmen der Level-4-Automatisierung zuverlässig zu lösen. 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 (Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO und Center of Automotive Management (CAM) 2023).

Dementsprechend ist zu nennen, dass das Testen und die Absicherung von Level-4-AVF-Systemen methodisch ebenfalls noch nicht abschließend gelöst sind. Die Gründe hierfür liegen in der je nach ODD ggf. sehr großen Ausdehnung des Testraums insbesondere bei komplexen Systemen sowie der Identifikation und Überprüfung von bislang unbekanntem Corner Cases (vgl. z. B. (ISO ISO 21448)). Szenario-basiertes Testen, das vor dem beschriebenen Hintergrund eine Lösung darstellen könnte, scheitert heute noch am Fehlen einer regulatorisch akzeptierten und bereichsübergreifenden Datenbasis, aber genauso am ausbleibenden Austausch von Corner Cases zwischen Organisationen. Des Weiteren werden Fahrer- und Verkehrsteilnehmermodelle als Referenz zur Ergänzung der Szenarien für die Überprüfung des Verhaltens und der Fähigkeiten des AVF-Systems benötigt (vgl. (Ad-Hoc-Gruppe „Smart Car“ et al. 2023)).

Zur Realisierung der Systeme ergeben sich daher eine Vielzahl atomarer Einzelherausforderungen, von denen nachfolgend einige beispielhaft aufgelistet sind:

- Automatisierte Identifizierung von Corner Cases 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 E/E-Architektur
- Gewährleistung der IT-Sicherheit (Security) über den gesamten Fahrzeuglebenszyklus
- Identifizierbarkeit von automatisierten Fahrzeugen (Signal, Funk) und Kommunikation mit nichtautomatisierten Verkehrsteilnehmern

Herausforderungen hinsichtlich
der Skalierbarkeit von AVF-
Systemen

Neben den beschriebenen technischen Einzelherausforderungen, die vornehmlich den Bereich der Entwicklung betreffen, gilt es des Weiteren, eine ökonomische Tragfähigkeit der Herstellung von AVF-Systemen zu erreichen. Diese ist heute nicht gegeben, da AVF-Systembestandteile und auch Fahrzeugservices nicht standardisiert sind und Skaleneffekte in der Entwicklung und Herstellung (noch) nicht gehoben werden können. Des Weiteren ist die sichere Integration von einzelnen Software-Komponenten zur Erstellung eines AVF-Stacks unterschiedlicher Hersteller auf einem Steuergerät aufwendig (vgl. (Tziampazis et al. 2023), (Thoen 2023)). Durch eine Modularisierung des AVF-Systems und Standardisierung ausgewählter Komponenten und Schnittstellen ließe sich ein Beitrag zur Senkung der hohen Integrationskosten leisten und damit ein Markt entstehen (vgl. Kapitel 3.2.4).

Bei Betrachtung der obenstehenden Ausführungen zeigt sich einerseits, dass die technologischen und technischen Herausforderungen in Abhängigkeit der ODD 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 ODDs des Level-3- und Level-4-Betriebs (vgl. z. B. (Schaal 2023)). In Bezug auf die Zulässigkeit und Transferierbarkeit der AVF-Systeme sowie Identifikation bislang unbekannter Corner Cases scheint hingegen der Aufbau eines akteursübergreifenden Erfahrungswissens zweckdienlich. Dies macht deutlich, dass für eine Umsetzung ausgewählter Anwendungsfälle die meisten technologischen und technischen Voraussetzungen grundsätzlich bereits vorhanden sind sowie eine Realweltumsetzung vor dem Hintergrund der Corner Cases angeraten erscheint. Das teleoperierte Fahren – dem sich in Deutschland auch einige Startups widmen (Heuberger 2023) – kann hierbei als Fallback-Lösung für bislang unbekanntes Corner Cases herangezogen werden.

3.2.2 Regulatorische und harmonisierungsbezogene Herausforderungen

In Bezug auf Level 3 ist Deutschland weltweit der erste Standort, an dem ein Automobilhersteller für die automatisierte Fahrfunktion auf Level 3 von den Behörden die Erlaubnis zum Betrieb im öffentlichen Raum erhalten hat (vgl. Kap. 2). Diese fand maßgeblich im regulatorischen Rahmen der UNECE WP.29 R157 „Automated Lane Keeping System (ALKS)“ statt (Schwarzer 2022; Mercedes-Benz 2023a; UN Regulation No. 157). Bei Level 3 ist es gestattet, dass die automatisierte Fahrfunktion bestimmte Fahraufgaben übernimmt. Dennoch ist weiterhin eine Person im Wagen notwendig, die jederzeit bereit sein muss, die Kontrolle zu übernehmen, wenn sie vom Fahrzeug zur Übernahme der Fahraufgabe aufgefordert wird. Hierfür die Betriebserlaubnis des KBA sowie die Betriebsbereichsgenehmigung vom Bund zu erhalten, gelang durch eine Zusammenarbeit von Fachkräften unterschiedlicher Disziplinen wie Technik, Recht- und Datenschutz (Mercedes-Benz 2023c). Auf dieser Grundlage hat Mercedes-Benz inzwischen auch von den US-amerikanischen Behörden die Genehmigung erhalten, seine automatisierte Fahrfunktion auf Level 3 in den USA verkaufen zu dürfen. Seit dem 1.1.2023 ist zudem

der Level-3-Betrieb bis 130 km/h auf Autobahnen zugelassen. Herausforderungen ergeben sich hierbei allerdings noch maßgeblich in einzelnen, technischen Bereichen, wie der E/E-Architektur, die allerdings kurz- bis mittelfristig überwunden werden dürften (vgl. Kapitel 3.2.1, (Schwarzer 2022; sp-x 2023)).

Herausforderungen hinsichtlich
der Skalierbarkeit von AVF-
Systemen

Mit dem Inkrafttreten der Verordnung zur Genehmigung und zum Betrieb von Kraftfahrzeugen mit autonomer Fahrfunktion in festgelegten Betriebsbereichen (Autonome-Fahrzeuge-Genehmigungs-und-Betriebs-Verordnung, AFGBV) ist Deutschland der weltweit erste Standort, an dem Level-4-Fahrzeuge in einem rechtlich abgesicherten Rahmen zugelassen werden können. Hier besitzt Deutschland eine Vorreiterrolle (vgl. Kapitel 2). Zur Genehmigung ist einerseits die nationale Betriebserlaubnis durch das Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) und andererseits die Genehmigung des Betriebsbereiches erforderlich. Der Antrag auf letztere muss im Sinne des § 1d (2) StVG bei den jeweiligen nach Landesrecht zuständigen Behörden beziehungsweise für Bundesfernstraßen bei der Autobahn GmbH gestellt werden (Kraftfahrtbundesamt 2023; Steininger 2022). Der Prozess für die nationale Betriebserlaubnis ist bereits grundsätzlich beim KBA definiert (vgl. (Kraftfahrtbundesamt 2023)), aufgrund mangelnder Anwendungsfälle allerdings bislang noch nicht erprobt oder von einem Hersteller durchlaufen worden. In Bezug auf die Betriebsbereichsgenehmigung gelten die Bundesländer Bayern, Hessen, Nordrhein-Westfalen und Baden-Württemberg als Vorreiter (Tagesspiegel 2023), bislang hat dazu jedoch lediglich Nordrhein-Westfalen einen Leitfaden im Rahmen einer Studie veröffentlicht (Steininger 2022). Offiziell herausgegebene Prozesse und Vorgehen gibt es in keinem Bundesland.

Dass für die Validierung und Zulassung der Level-4-Systeme noch keine erprobten und einheitlichen Prozesse definiert sind sowie dass unterschiedliche Verantwortlichkeiten und damit abweichende Prozesse und Ansprechpartner je nach Bundesland vorhanden sein könnten, stellt trotz prinzipiell vorhandener regulatorischer Rahmenbedingungen für die beteiligten Stakeholder eine Herausforderung dar. Diese äußert sich in Befürchtungen, dass ...

- auf föderaler Ebene unterschiedliche Prozesse etabliert werden,
- fragmentierte Zuständigkeiten und damit Kommunikationswege je Bundesland gewählt werden,
- die Prozesse auf Bundes- und Landesebene aufgrund zu hoher Bürokratie die Innovationskraft und Geschwindigkeit beschränken und
- aufgrund der jeweils lokal notwendigen und integrativ an die vorhandene Infrastruktur gebundenen Betriebsbereichsgenehmigung die Innovationsgeschwindigkeit langfristig gehemmt sowie bestimmte Geschäftsmodelle nicht mehr tragfähig werden.

Diese Befürchtungen beziehen sich hauptsächlich auf die untergesetzlichen nationalen Ebenen und können sich aus Perspektive der genannten Quellen zu Herausforderungen entwickeln beziehungsweise existieren aktuell bereits in Form von prozessualen Unsicherheiten, die Herausforderungen bei der Realisierung bestimmter Anwendungsfälle darstellen (Malterer 2023). So wird unter anderem befürchtet, dass es ohne ein harmonisiertes Vorgehen beziehungsweise einheitliche Prozesse oder durch zu bürokratische Prozesse zu langen Bearbeitungszeiten und unterschiedlichen Bewertungskriterien in den einzelnen Bundesländern kommt. Dies könnte insbesondere Anwendungsfälle mit großflächigeren ODDs wie beim Ridepooling oder aus dem „Ownership“-Bereich unwirtschaftlich machen (KPMG 2020).

Einzelherausforderungen in Bezug auf den konkreten regulatorischen Level-4-Rahmen beziehen sich beispielsweise auf die Qualifikation des Wartungspersonals bei der Abfahrtskontrolle beziehungsweise der technischen Aufsicht (Hochschulabschluss oder staatlich geprüfter Techniker erforderlich). Dies wird von unterschiedlichen Akteuren als zu hoch und daher hinderlich für einen skalierten, wirtschaftlichen Betrieb eingestuft.

Einerseits sei vor dem Hintergrund des Fachkräftemangels eine Verfügbarkeit des jeweiligen Personals nicht gegeben, andererseits damit entsprechende finanzielle Aufwände verbunden. Als mögliche Lösung wird hier die Einführung des Delegationsprinzips für die Abfahrtskontrolle vorgeschlagen (VDV 2021). Weitere genannte Herausforderungen beziehen sich auf fehlende digitale Alternativen zur Abfahrtskontrolle, zu hochfrequente Intervalle der Fahrzeugprüfungen, die Fragestellung der Lenkzeiten automatisierter Systeme und deren Überwachenden, unklare oder bislang undefinierte Rechtsbegriffe, fehlende rechtswissenschaftliche Literatur sowie rechtliche Fragestellung in bislang hypothetischen Einzelfällen. Vereinzelt werden in diesem Kontext des Weiteren notwendige Anpassungen des Personenbeförderungsgesetzes (PBefG) sowie der Verordnung über den Betrieb von Kraftfahrunternehmen im Personenverkehr (BOKraft) zur Realisierung spezifischer Anwendungsfälle als Herausforderungen genannt (vgl. z. B. (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz der Bundesrepublik Deutschland und ifok GmbH 2023; Bitkom e.V. 2022)).

Herausforderungen hinsichtlich
der Skalierbarkeit von AVF-
Systemen

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass in allen Quellen neben den offenen Herausforderungen explizit die Vorreiterrolle Deutschlands in Bezug auf die Level-4-Gesetzgebung hervorgehoben wird, die mit dem AFGBV geschaffen wurde. Weitere Einzelherausforderungen für die Skalierbarkeit werden in diesem Kontext daher unter anderem in Bezug auf eine Einführung und Harmonisierung dieses regulatorischen Rahmens in der Europäischen Union (EU) sowie im UNECE WP.29 gesehen. Aktuell führten diese Punkte zu einer eingeschränkten Marktgröße und verhinderten mittelfristig eine umfassende Skalierung von AVF-Systemen sowie den Einsatz auf EU-Ebene.

Prozessual wird innerhalb des regulatorischen Rahmens sowohl der Level-3- als auch der Level-4-Systeme die regularienkonforme Absicherung von autonomen, vernetzten Fahrzeugsystemen in Deutschland als zusätzliche Herausforderung gesehen, da diese noch Lücken aufweise. Die rechtlichen Vorschriften seien nicht ausreichend an die technologische Entwicklung angepasst und es fehlten einheitliche Standards, die die Zuverlässigkeit, Sicherheit und Vertrauenswürdigkeit autonomer Fahrzeuge gewährleisten (VDI 2020). Eine fehlende gemeinsame Datenbasis und der Umgang mit inkrementellen Systemoptimierungen durch Updates sind weitere offene und ungeklärte Fragen. Hersteller können nach Updates homologationskritischer Komponenten aktuell nicht selbst die Sicherheit nachweisen, was zusätzliche finanzielle Belastungen durch umfassende Abnahmen und Verzögerungen im Updateprozess mit sich bringt (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz der Bundesrepublik Deutschland und ifok GmbH 2023).

Der Austausch von Daten, insbesondere personenbezogener Daten, die in AVF-Systemen erhoben werden, unterliegt bislang lediglich der DSGVO und ist daher oftmals unklar (vgl. z. B. (Kremp 2023)). Die Teilnahme an einer Daten- und Szenarien-Austauschplattform ist freiwillig, was zur Vernachlässigung vieler spezifischer Corner Cases führt, aber eine Skalierung von AVF-Systemen in Deutschland vorantreiben könnte.

Weitere Herausforderungsfelder zeigen sich zusätzlich im Bereich der Standardisierung und dem darauf basierend einheitlichen Infrastrukturausbau von V2X-Schnittstellen. Bereits auf den unteren Ebenen „Access Technologies“ sowie „Network and Transport“ des V2X-Stacks existieren etwa im deutschsprachigen Raum Europas mit WLAN IEEE 802.11p (DSRC bzw. ITS-G5) und 3GPP C-V2X zwei unterschiedliche Übertragungstechnologien, die von den diversen Herstellern differenziert favorisiert werden (Vector 2023b; Vogel 2023; Hartmann 2021). Nach wie vor ist dementsprechend ungeklärt, ob ein sich etablierender Standard für die V2X-Kommunikation auf WLAN802.11p, 5G oder 6G basieren wird. In Bezug auf die höheren Ebenen des V2X-Stacks lässt sich hingegen feststellen, dass bereits eine Vielzahl an Datenformaten, -strukturen und Anwendungsfällen für diese Technologien standardisiert ist (vgl. z. B.

ETSI EN 302 637, ISO/TR 21186, (CAR 2 CAR Communication Consortium 2023; ISO/TR ISO/TR 21186; Europäisches Institut für Telekommunikationsnormen ETSI)). Diese fokussieren allerdings aktuell vornehmlich Anwendungsfälle im Bereich des Level-2- und Level-2+-Betriebs, sind noch nicht vollständig ausgerollt und berücksichtigen Infrastrukturdaten nicht in allen Anwendungsfällen des Level-3- und Level-4-Betriebs (vgl. z. B. (CAR 2 CAR Communication Consortium 2023; Hartmann 2021)). Kritisch gesehen wird des Weiteren, dass diverse Hersteller eigene Adaptionen der Standards verwenden, die in der konkreten Implementierung mit den Standards anderer Hersteller inkompatibel sind, was wiederum den gesellschaftlichen und funktionsbezogenen Nutzen besagter Technologie einschränkt (Kroth 2023). Die zwar schrittweise, aber langsam stattfindende Harmonisierung wird daher im Hinblick auf eine reduzierte Innovationsbereitschaft, auf eine mögliche Marktfragmentierung und auf erhöhte Investitionsbedarfe (da z. B. konkurrierende Technologien in der Infrastruktur vorhanden sein müssen) kritisch gesehen. Zusätzlich wird im Bereich der sich ergebenden Geschäftsmodelle sowie dem Austausch von Corner Cases angemerkt, dass hier aus technischer Perspektive ebenfalls die Standardisierung von Datenmodellen und Datenaustauschformaten durch die Schaffung einheitlicher Schnittstellen im Bereich Software und Hardware anzustreben wäre, um eine Skalierung der AVF-Systeme zu begünstigen (Bratzel und Böbber 2023).

Herausforderungen hinsichtlich
der Skalierbarkeit von AVF-
Systemen

Die beschriebenen Umstände bei unterschiedlichen Herausforderungen aus dem Bereich der Regulatorik zeigen, dass am Standort Deutschland die prinzipiellen Rahmenbedingungen ausreichend vorhanden sind, erkennbare Herausforderungen allerdings noch in der prozessualen Ausgestaltung dieser Rahmenbedingungen vorliegen. In Bezug auf die Harmonisierung wird insbesondere das Thema der V2X-Infrastruktur adressiert.

3.2.3 Herausforderungen bezüglich Markt, Wertschöpfung und Wettbewerbsposition

Insbesondere die deutsche Automobilindustrie wurde Jahrzehnte lang in aller Welt für die Entwicklung und Herstellung innovativer Produkte geschätzt. Beginnend mit der Verbreitung der Elektromobilität und verstärkt mit der Einführung von AVF-Systemen treten zunehmend Unternehmen aus dem außereuropäischen Ausland als Wettbewerber hinsichtlich Mobilitätsprodukten und Dienstleistungen auf, die die Bedürfnisse des Markts verstehen und bedienen können (vgl. Kapitel 2). Dieser Trend wird zwar in Deutschland inzwischen ernst genommen und es gibt zahlreiche Bemühungen, gegenüber Wettbewerbern aus den USA oder dem asiatischen Raum nicht in Rückstand zu geraten. Hierfür müssen allerdings auch derzeit vor Ort gegebene nachteilige Standort- und Wertschöpfungsfaktoren überwunden werden.

Für die erfolgreiche Einführung des autonomen Fahrens auf Level 4 in Deutschland ist eine möglichst vollständige Wertschöpfungskette zur Entstehung eines Level-4-Stacks von Bedeutung. Eine vollständige Wertschöpfungskette würde sicherstellen, dass die hohen Standards, die in Deutschland und der EU gelten, in allen Phasen der Entwicklung, Herstellung und Vermarktung der Technologie eingehalten werden. Zusätzlich würde sie die Abhängigkeit von ausländischen Unternehmen und Technologien verringern und die Souveränität Deutschlands und der EU in Bezug auf die automatisierte Fahrzeugtechnologie stärken. Um AVF-Systeme skalierbar zu gestalten, müssen Lieferengpässe vermieden und Abhängigkeiten minimiert werden. Die Herausforderungen bestehen diesbezüglich aktuell darin, dass sich die Förderung und Verarbeitung kritischer Rohstoffe zur Herstellung der Hardwaresysteme (z. B. Gallium, Germanium und Kobalt) sowie entsprechende Chip-Fertigungskapazitäten derzeit in außereuropäischer Hand befinden (Europäische Kommission 2020). Ebenso sind die Kompetenzen über ausgewählte, zumeist KI-basierte Algorithmen sowie die vernetzende Cloud-Infrastruktur im Ausland lokalisiert (Forbes 2023). Des Weiteren fehlen im europäischen

Wertschöpfungsnetzwerk Akteure, die aufgrund ihrer finanziellen als auch personellen Ressourcen die Entwicklung eines vollständigen Level-4-Stacks stemmen können.

Auf Seiten der Akteure wird verstärkend dazu als Herausforderung eine sinkende Attraktivität Deutschlands als Innovationsstandort im Allgemeinen genannt. Ein dabei häufig genannter Punkt ist die Fachkräfteverfügbarkeit. Vor allem für AVF-relevante Technologien wie KI/Machine Learning, Big-Data-Analysen, Software- und Applikationsentwicklung sowie Elektronik fehlt es bereits heute an geschultem Personal. So konnten in Deutschland in den Jahren 2021 und 2022 im Durchschnitt über 13.000 Stellen für Informatikexpertinnen und -experten nicht besetzt werden (Hickmann und Koneberg 2022). In Bezug auf die Skalierungsmöglichkeit der AVF-Systeme ist zu erwähnen, dass die Komplexität der Fahrzeugsysteme in allen Tätigkeitsbereichen durch die Automatisierung und Vernetzung zunimmt. Dementsprechend wird als Herausforderung formuliert, dass es an zusätzlichen Schulungen und Qualifikationen fehlt, damit fachkundiges Personal mit der technologischen Entwicklung Schritt halten kann. Dies betrifft zum einen die Bereiche der Entwicklung, Herstellung und des Betriebs von AVF-Systemen, allerdings auch den allgemeinen After Sales Markt mit Händlern und Werkstätten (vgl. z. B. (Herrmann et al. 2023; Maier et al. 2023)). Die Herausforderung des Fachkräftemangels steht dabei der Herausforderung einer möglichst vollständigen Abbildung der Wertschöpfungskette innerhalb Deutschlands oder der EU entgegen, da diese voraussichtlich eine noch höhere Fachkräftenachfrage induzieren würde. Als weitere, allgemeine Herausforderungen des Innovationsstandorts Deutschland werden z. B. eine geringe Kooperation der Forschung und Entwicklung mit der Industrie, nur begrenzt akquirierbares Risikokapital, Überbürokratisierung sowie Energiepreise genannt.

In eine ähnliche Richtung weist ein Herausforderungsfeld, das die geringe Agilität, Qualität und Nachhaltigkeit von Forschungsprojekten im Kontext des Level-4-AVF adressiert. Einerseits entsteht durch die bürokratisch ausgeprägten Ausschreibungsverfahren ein erhöhter Aufwand seitens der Antragstellenden als auch seitens der Fördermittelgebenden. Andererseits bedingt dies ebenfalls lange Prozesse der Begutachtung und Prüfung. Entsprechend vergeht Zeit von der Idee für ein Projekt bis zu dessen Beginn. Mit den geplanten Forschungsarbeiten darf in der Regel gemäß den Förderbedingungen nicht früher begonnen werden. Als Herausforderung wird daher in diesem Kontext angeführt, dass die Innovationsgeschwindigkeit durch die bürokratischen Prozesse und auch die Aufwände gesenkt beziehungsweise der Inventions- oder Innovationsgrad eines Förderprojekts nicht immer gegeben ist, da dieser vom Stand der Technik in einem dynamischen Umfeld überholt wurde. Die Förderbedingungen verbieten des Weiteren für gewöhnlich einen sich selbst tragenden und somit kommerziellen Betrieb beispielsweise der installierten Infrastruktur nach Projektende, was zwangsläufig deren Stilllegung beziehungsweise Rückbau nach sich zieht. Eine Skalierung auf Basis der von geförderten Projekten erarbeiteten Ergebnisse kann daher nicht stattfinden. Ebenfalls zur geringen Nachhaltigkeit und Qualität von Forschungsprojekten tragen gemäß den Quellen vergleichsweise geringe Fördermittel für Industrie- und bestimmte Wissenschaftspartner, die aufwendige Beantragung von Anschlussprojekten, zu gering ambitionierte Vorgaben, eine fehlende Verbreitung von Erkenntnissen sowie ein Ausbleiben von Vernetzung und Erfahrungsaustausch bei.

Auf ökonomischer Seite steht dabei die Tragfähigkeit von AVF-Systemen und ihrer angebotenen Dienstleistungen als mittel- beziehungsweise langfristige Herausforderung der Skalierbarkeit. So lässt sich bereits heute beobachten, dass die unmittelbare Zahlungsbereitschaft oftmals nicht ausreicht, um die Kosten für entsprechende Level-3-Systeme oder das Dienstleistungsangebot im Bereich der Mobilität vollständig zu decken (vgl. z. B. (McKinsey 2023)). Als Resultat sind Level-3-Systeme aktuell nur im Luxussegment mit hoher Zahlungsbereitschaft verfügbar. Die Möglichkeit andersartig ausgerichteter Geschäftsmodelle unterliegt dabei verschiedenen Faktoren, wie dem

Herausforderungen hinsichtlich
der Skalierbarkeit von AVF-
Systemen

Automatisierungsgrad und der ODD. In Bezug auf die ökonomische Tragfähigkeit von Level-4-AVF-Systemen im öffentlichen „Sharing“-Betrieb fehlt aktuell noch eine angemessene Bewertung der Vorteile dieser Systeme unter Berücksichtigung des Wertbeitrags (vgl. Kapitel 2 und Anhang 2). Der Wert, der beispielsweise durch den Ausgleich des Effekts „Mangel an Fahrern“ im ÖPNV geschaffen wird oder die resultierende Erhöhung der Sicherheit durch AVF-Systeme kann nicht angemessen quantifiziert werden. Demgegenüber stehen kostenintensive Angebotspreise, solange eine Standardisierung der Architektur, ausgewählter Komponenten und Schnittstellen sowie Testmethoden eines AVF-Systems noch nicht erfolgt ist (vgl. Kapitel 3.2.1). Kosten im Aftermarkt, die bspw. bei komplexen Servicearbeiten, Wartung, technischer Aufsicht, Instandsetzung oder auch im Kontext des Sicherheitskonzepts entstehen, sind zudem aktuell aufgrund fehlender Erfahrungswerte nicht klar ersichtlich. Dementsprechend wird insbesondere die Herausforderung darin gesehen, tragfähige Geschäftsmodelle für AVF-Systeme in ihren unterschiedlichen Ausprägungen zu generieren. Während im „Sharing“-Betrieb durchaus denkbar ist, dass die Systeme Aufgaben des ÖPNV übernehmen und damit in einem gewissen Rahmen nicht vollständig kostendeckend arbeiten dürfen, ist dies im Ownership- oder Logistics-Bereich nicht der Fall. Dementsprechend wird auch die fehlende Erfahrung potenzieller Kunden und Passagiere mit Systemen der entsprechenden ODD aufgrund dadurch verminderter Zahlungsbereitschaft und gesellschaftlicher Akzeptanz kritisch gesehen (bzgl. letzterem vgl. Kapitel 3.2.4). Aktuell fehlt noch eine kundenattraktive, skalierbare Lösung, die einen konkreten Mehrwert bietet und die entsprechende Zahlungsbereitschaft hinsichtlich der AVF-Systeme erhöht (vgl. Kapitel 2.3). Als eine zentrale Herausforderung für derartige Geschäftsmodelle wird die Verfügbarkeit des AVF-Systems bezeichnet, die die Planbarkeit des Einsatzes a priori ermöglicht und technisch realisiert werden muss (vgl. Kapitel 3.2.1).

Herausforderungen hinsichtlich
der Skalierbarkeit von AVF-
Systemen

Auf dieser ökonomischen Betrachtung aufbauend lässt sich erklären, warum aktuell ein fehlender Markt für autonome Level-4-Systeme als Herausforderungsfeld genannt wird. So sehen Flottenbetreiber zwar beispielsweise im öffentlichen Nahverkehr einen potenziell großen Markt, der volumenbezogen in Europa aktuell jedoch nahezu nicht existent ist (vgl. Kapitel 2 und (Deloitte Deutschland 2023; berylls 2022b)). Einerseits existiert die dargelegte Unsicherheit bezüglich langfristig tragfähiger Geschäftsmodelle, die eine großflächige Implementierung – zusammen mit den technischen, regulatorischen und infrastrukturellen Herausforderungen – verhindert. Hinzu kommen geringe Erfahrungswerte und hohe Kosten für die Anschaffung, Integration, Inbetriebnahme und den schlussendlichen Betrieb der Systeme. Dementsprechend entstehen zunächst nur Bedarfe mit geringen Stückzahlen, die auf wenige Anbieter mit Kleinstserien treffen. Dies führt zu erhöhtem Aufwand in der Entwicklung und Produktion auf Seiten der Hersteller, da Skaleneffekte nicht genutzt werden können. Die Diversität der Regulierungen macht es schwierig, Großserien von AVF-Fahrzeugen zu realisieren. Die Marktentwicklung erfolgt langsam, da die hohen Anschaffungskosten wiederum die Nachfrage begrenzen. Als zentrale Herausforderungen werden daher ein fehlender Markt sowie eine nicht vorhandene Agenda zur Forschung, Entwicklung und Förderung der AVF-Produktion gesehen, um die Stückkosten zu senken und den Markt entstehen zu lassen.

Obenstehende Schilderungen der Situation bei verschiedenen Standort- und Wertschöpfungsfaktoren machen deutlich, dass die zahlreichen systemischen Herausforderungen, die mit der Wertschöpfung und der Wettbewerbsposition Deutschlands zusammenhängen, viele Stakeholdergruppen berühren. Zur Bewältigung bedarf es daher in vielen Fällen entsprechend aufeinander abgestimmter Zusammenarbeit mehrerer unterschiedlicher Akteure, die jeweils ein individuelles Kooperationsrisiko im Wertschöpfungsnetzwerk übernehmen müssen.

3.2.4 Gesellschaftliche und infrastrukturbezogene Herausforderungen

Herausforderungen hinsichtlich
der Skalierbarkeit von AVF-
Systemen

Mobil zu sein ist ein Bedürfnis, das in der Bevölkerung von Jahr zu Jahr immer mehr an Bedeutung gewinnt. So ist in den vergangenen Jahren, mit Ausnahme der Corona-Pandemie, die Zahl der Personenkilometer konstant angestiegen (Statistisches Bundesamt 2019). Neben der Nutzung konventioneller Fortbewegungsmittel wächst auch die Bereitschaft, innovative Mobilitätslösungen zumindest zu testen, wie sie auf Basis von AVF-Systemen angeboten werden können (Stegmüller et al. 2019). Die mit der Zunahme der Nachfrage zusammenhängenden Herausforderungen, die etwa den Ausbau der Infrastruktur oder die Akzeptanz der Gesellschaft betreffen, werden nachfolgend behandelt.

Eine zentrale Voraussetzung für AVF-Systeme aller Automatisierungsgrade ist ein flächendeckender und standardisierter Infrastrukturausbau in der für den Anwendungsfall jeweils relevanten ODD. Der Begriff des standardisierten Infrastrukturausbaus ist dabei im Hinblick auf die Art und Weise des Ausbaus („In welchen ODDs 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 (Bitkom 2023b), 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 V2X-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 (Bundesnetzagentur 2023; Bratzel und Böbber 2023). 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 abgeben. Bereitgestellte Daten können daher aktuell nur als Anreicherung der fahrzeugeigenen Perzeption genutzt werden.

In Bezug auf fahrerlose Level-4-Systeme erklären zum aktuellen Zeitpunkt die Hälfte der Deutschen, diese nicht nutzen zu wollen. Lediglich jeder fünfte kann sich die Nutzung autonomer Fahrzeuge sehr gut vorstellen (Bratzel 2022), (McKinsey 2023). Die fehlende Akzeptanz auf Seiten der Nutzenden, aber auch weiterer Verkehrsteilnehmender stellt daher ein gesellschaftliches Herausforderungsfeld dar. Allgemeine Vertrauens- und Sicherheitsbedenken entstehen bei der Vorstellung, die Kontrolle einem computergestützten AVF-System zu überlassen. Knapp 40 % der Bevölkerung verweisen hierbei auf durch die Systeme möglicherweise verursachte Unfälle oder das Risiko von Cyberangriffen (Bratzel 2022). Um ein angemessenes Verständnis und eine Akzeptanz in der Bevölkerung zu schaffen, ergeben sich entsprechend Herausforderungen in Bezug auf die Aufklärung über vorhandene Sicherheitsmaßnahmen und Abläufe. Die mediale Berichterstattung behandelt die Erfolge von prototypischen AVF-Systemen ebenso kritisch wie Misserfolge (vgl. (Wilkens 2023a; Witte 2023)). Oft führt dies zu einer Überschätzung der Unfallgefahr autonomer Fahrzeuge. Des Weiteren fehlt es an gesellschaftlich akzeptierten und ethisch fokussierten Leitlinien bezüglich angemessener Sicherheitsstandards der automatisierten Fahrzeuge und dafür zu ergreifender Maßnah-

men. Daraus resultiert die Herausforderung, dass es an anerkannten Fahrermodellen fehlt, die als Referenz für Verhalten und Fähigkeiten in verschiedenen Verkehrssituationen dienen. Neben dem Sicherheitsempfinden sind die Mehrwerte automatisierter Systeme in den verschiedenen Anwendungsfällen auch nur knapp zwei Drittel der potenziell Nutzenden bekannt (Bratzel 2022). Weitere Ängste bestehen bezüglich eines Datenabgriffs, der persönlichen Überwachung sowie der Kannibalisierung nachhaltiger Verkehrsmittel oder einer Erhöhung des Individualverkehrsaufkommens.

Herausforderungen hinsichtlich
der Skalierbarkeit von AVF-
Systemen

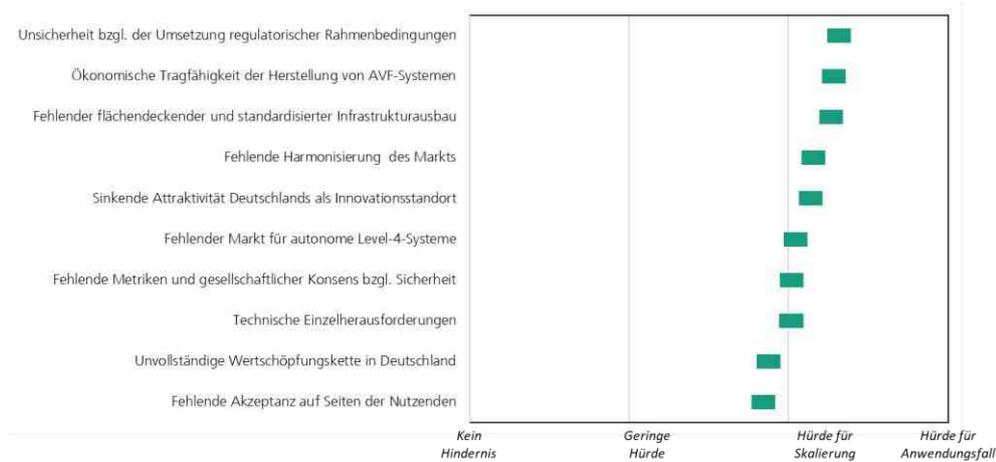
Abschließend können diverse Herausforderungen bezüglich eines Widerstands gegenüber der technologischen und gesellschaftlichen Veränderung festgestellt werden, die mit der Einführung von AVF-Systemen einhergehen. Beispiele hierfür sind Ängste bezüglich eines Beschäftigungsabbaus aufgrund der Automatisierung und damit verbundene Widerstände der Gewerkschaften und Verbände. Diese Herausforderung steht inhaltlich in einem konträr-komplementären Zusammenhang mit der Herausforderung des Fachkräftemangels. So können einerseits Umschulungen und Arbeitsortverlagerungen zur technisch-digitalen Aufsicht oder auch als Remote Driver auf individueller Ebene Anpassungswiderstände hervorrufen. Andererseits sind die Auswirkungen auf die Beschäftigungen speziell im ÖPNV bislang ungewiss, ein sich etablierender Fahrer-mangel allerdings real. Auf gesellschaftlicher Ebene sind die Vorstellungen über ein zukunfts-fähiges, nachhaltiges Mobilitätssystem bislang nicht synchronisiert. Dies führt zum Widerstand einzelner Interessensgruppen gegen spezifische Anwendungsfälle, was wiederum zu Herausforderungen in der Skalierung einzelner Anwendungsfälle führt. Unternehmensbezogen ergeben sich Widerstände zur gemeinsamen Überwindung bereits geschilderter Herausforderungen, da diese den Geschäftsmodellen einzelner Organisationen abträglich sein könnten. Beispiele hierfür sind fehlende Standardisierungsbemühungen, da ein Verlust von Alleinstellungsmerkmalen befürchtet wird (vgl. (Potinecke et al. 2023)).

Bei Betrachtung der obenstehenden Beschreibungen wird deutlich, dass neben der Überwindung der bisher genannten Herausforderungsbereiche für die Skalierung ebenfalls eine Kommunikation sowie ein Dialog auf gesellschaftlicher Ebene notwendig wird, um die Akzeptanz der Bevölkerung für derartige Systeme zu erhöhen, einen Infrastrukturauf- und -ausbau zu ermöglichen sowie die vorhandenen Widerstände auf Seiten der Betroffenen zu reduzieren.

3.3 Zentrale Herausforderungsfelder

Im Folgenden erfolgt eine Bewertung der eingeführten Herausforderungsfelder (vgl. Kapitel 3.1 und 3.2) mit dem Ziel, diejenigen Herausforderungen im Hinblick auf die Handlungsempfehlungen zu identifizieren, deren Überwindung besonders zur Skalierbarkeit von AVF-Anwendungsfällen beiträgt. Dafür wurden die Herausforderungsfelder bezüglich ihrer Auswirkungen auf die AVF-Anwendungsfälle aus Kapitel 2.3 untersucht und einzeln bewertet. Die Bewertung fand auf einer vierstufigen Skala statt. Stufe null bedeutet, dass von der Herausforderung keine Auswirkungen auf den Anwendungsfall einwirken. Stufe eins bezeichnet eine geringe Hürde in der Umsetzung, während eine Bewertung auf Stufe zwei eine Hürde für die Skalierung des Anwendungsfalls beschreibt. Die höchste Bewertung (Stufe drei) beschreibt, dass die Herausforderung eine Umsetzung des Anwendungsfalls behindert. Die Bewertung wurde von Experten vorgenommen, wobei die Ergebnisse des Call for Evidence (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz der Bundesrepublik Deutschland und ifok GmbH 2023) sowie der Umfrage während des AVF-Workshops (Ad-Hoc-Gruppe „Smart Car“ et al. 2023) in Form der Nennungshäufigkeit berücksichtigt wurden. Die Gesamtrelevanz wurde anschließend durch Mittelwertwertbildung über alle Anwendungsfälle sowie separiert für die Anwendungsbereiche „Ownership“, „Sharing“ und „Logistics“ berechnet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 8, 9, 11 und 12 dargestellt.

Abbildung 8: Rangliste der zehn als am relevantesten identifizierten Herausforderungsfelder über alle Anwendungsfälle hinweg



Herausforderungen hinsichtlich der Skalierbarkeit von AVF-Systemen

Quelle: Eigene Darstellung¹

Als relevantestes Herausforderungsfeld über alle Anwendungsfälle hinweg werden diejenigen Einzelherausforderungen eingestuft, die die Unsicherheit bezüglich der Umsetzung aktueller regulatorischer Rahmenbedingungen betreffen (vgl. Abbildung 8). Zur hohen Kritikalität tragen dabei allerdings diverse Faktoren bei, die einerseits bezüglich des Anwendungsfalles und des Automatisierungsgrads sowie bezüglich des Zuständigkeitsbereichs zu unterscheiden sind. So wird der vorhandene regulatorische Rahmen z. B. durch das Straßenverkehrsgesetz (StVG) und die Autonome-Fahrzeuge-Genehmigungs-und-Betriebs-Verordnung (AFGBV) nach Expertenmeinungen als zentraler und zielführender Baustein für den AVF-Innovationsstandort Deutschland bezeichnet. Die identifizierten und als kritisch für die Skalierung benannten Herausforderungen beziehen sich vielmehr auf die bislang unsichere, untergesetzliche, nationale Umsetzung sowie die Vereinheitlichung auf europäischer Ebene (vgl. Kapitel 3.2.2). Dabei ist es relevant, darauf hinzuweisen, dass die Bewertung dieses Herausforderungsfelds auf Basis der Befürchtungen einer möglicherweise suboptimalen, bürokratischen und föderal ausgeprägten Ausgestaltung aktuell unbekannter – da noch festzulegender – Umsetzungen erfolgt.

So sind konkrete Prozesse, Prozesskriterien und notwendige Dokumente auf Bundes- und Landesebene für das erstmalige Level-4-Genehmigungsverfahren sowie für das Genehmigungsverfahren nach Updates bislang nicht durchlaufen worden beziehungsweise teilweise noch nicht definiert (vgl. Kapitel 3.2.2). Die föderale Zuständigkeit bei der Betriebsbereichsgenehmigung wird insbesondere von potenziellen Level-4-Fahrzeugsystemherstellern, die Fahrsysteme über lokal-definierte ODDs hinweg entwickeln und zulassen möchten, als hinderlich für die Skalierung eingestuft. Besonders kritisch gesehen wird dies für die Anwendungsfälle im „Ownership“- und „Logistics“-Bereich, die über lokal definierte ODDs hinausgehen. Im „Sharing“-Bereich zeichnen sich hingegen divergierende Meinungen bezüglich des Herausforderungscharakters ab: Wäh-

¹ Die Auswertung der Antworten erfolgte auf Basis eines hybriden Bewertungskonstrukts in dem sowohl die Nennungshäufigkeit als auch der Aussageinhalt berücksichtigt wurden. Um einer Scheingenaugigkeit vorzubeugen, wird daher auf eine Nennungshäufigkeit verzichtet. Die Anzahl befragter Experten und ausgewerteter Quellen kann Kapitel 3.1 entnommen werden.

rend auch hier die potenziellen Level-4-Systemhersteller größere Hürden für die Skalierung im Bereich der Herstellungs- und Zulassungskosten sehen, wird dies von Experten der Betreiberseite als geringe Hürde eingestuft, da diese zumeist nur lokal operieren.

Herausforderungen hinsichtlich
der Skalierbarkeit von AVF-
Systemen

Als zusätzliche relevante Herausforderung wird in diesem Kontext die Vereinheitlichung der Regulatorik auf europäischer Ebene genannt. Die deutschen Regelungen für AVF-Systeme auf Level 4 finden internationale Beachtung (vgl. Kapitel 3.2.2) und können sowohl zu einer technologischen als auch regulatorischen Vorreiterrolle führen. Eine bislang ausstehende, erfahrungsbasierte Weiterentwicklung sowie ein Transfer auf die europäische Ebene, auf der aktuell lediglich Kleinserientypzulassungen möglich sind, wird daher als eine Begrenzung der Skalierungsfähigkeit gesehen (vgl. z. B. (KBA 2023a)). Über alle Einschätzung hinweg, führt zusätzlich die Befürchtung einer Überbürokratisierung des Genehmigungsprozesses zur hohen Bewertung dieses Herausforderungsfelds.

Insgesamt ist die Überwindung dieses Herausforderungsfelds zwar als zentral zur Realisierung skalierbarer AVF-Anwendungsfälle zu verstehen. Da die Umsetzung des regulatorischen Rahmens allerdings aktuell definiert wird, bestehen ausreichend Möglichkeiten, diese Herausforderungen mit geringem Aufwand zu überwinden. Insofern sollten die befürchteten Herausforderungen (vgl. Kapitel 3.2.2) in der Umsetzung und Ausgestaltung in den untergesetzlichen nationalen und föderalen Ebenen berücksichtigt werden, wenn entsprechend erste Anwendungsfälle zur Prozessausgestaltung vorliegen. Hinzu kommen weitere Unsicherheiten bezüglich ungeklärter Rechtsbegriffe in den entsprechenden Verordnungen und Gesetzen (z. B. der Zuverlässigkeitsbegriff, (Ad-Hoc-Gruppe „Smart Car“ et al. 2023)), fehlende rechtswissenschaftliche Literatur als auch rechtlich bislang ungeklärte Situationen, z. B. bei einem Unfall im Dual-Mode-Betrieb oder bezüglich der Lenkzeitenregelung. Dies führt in Summe dazu, dass die genannten Unsicherheiten in der Umsetzung trotz vorhandenem Rechtsrahmen aktuell noch als größte Hürde für die Einführung und Skalierbarkeit der Anwendungsfälle wahrgenommen werden. In Bezug auf die Level-3-Systeme werden lediglich kleinere Herausforderungen in der Umsetzung der regulatorischen Rahmenbedingungen gesehen.

An das Herausforderungsfeld „Unsicherheit bezüglich der Umsetzung regulatorischer Rahmenbedingungen“ schließen sich eine Reihe an Herausforderungsfeldern an, die die ökonomische Tragfähigkeit von AVF-Systemen für die einzelnen Anwendungsfälle mit ihren ODDs aus Perspektive der Herstellung, der Marktexistenz und -heterogenität sowie der Infrastruktur adressieren (vgl. Abbildung 8). Dies ist konsistent mit der aktuellen Verortung der Technologie im Gartner Hype Cycle (vgl. Kapitel 1.1). In Richtung einer großflächigen Markteinführung werden unter anderem die geschäftsmodellbezogenen Herausforderungen zunehmend relevant (Gartner Research 2023).

Im Hinblick auf die Handlungsempfehlungen ist bei den ökonomisch orientierten Herausforderungsfeldern zu erwähnen, dass insbesondere die Felder „Fehlender flächendeckender und standardisierter Infrastrukturausbau“, „Ökonomische Tragfähigkeit der Herstellung von AVF-Systemen“ und „Fehlende Harmonisierung des Markts“ eine nicht vorhandene Vereinheitlichung in den Bereichen der technischen Fahrzeugsysteme, des infrastrukturellen Ökosystems und der Anforderungen der Nachfrageseite adressieren. Der fehlende flächendeckende und standardisierte Infrastrukturausbau verweist einerseits auf Unzulänglichkeiten in der Menge und Koordination bislang aufgebauter Infrastruktur, inkludiert andererseits aber auch fehlende Normen und Standards oder die bislang fehlende Marktdiffusion eines vorherrschenden Standards. Die fehlende Harmonisierung des Markts bezieht sich außerdem nicht ausschließlich auf den regulatorischen Rahmen (vgl. (Höreth 2021)), sondern auch auf die Nutzung der gleichen Standards, harmonisierter Normen und einheitlicher Marktmechanismen sowie Anforderungskataloge, die beispielsweise in Ausschreibungen zum Einsatz kommen. Dement-

sprechend adressiert die fehlende Marktharmonisierung auch nicht nur den europäischen, sondern explizit ebenfalls den innerdeutschen Raum. Das Herausforderungsfeld „Fehlender Markt für autonome Level-4-Systeme“ beschreibt hingegen den Sachverhalt, dass aufgrund zu hoher Kosten für die Entwicklung, Herstellung und den Betrieb von AVF-Systemen keine Nachfrage entsteht. Dementsprechend existieren nur wenige Anbieter kommerzieller Systeme (vgl. Kapitel 2.2), die aufgrund fehlender Skaleneffekte die Kosten für Entwicklung, Herstellung und Betrieb auch nicht weiter senken können.

Herausforderungen hinsichtlich
der Skalierbarkeit von AVF-
Systemen

Zwischen den ökonomisch motivierten Herausforderungsfeldern befindet sich an fünfter Stelle zusätzlich das Feld „Sinkende Attraktivität Deutschlands als Innovationsstandort“. Dieses umfasst unter anderem die Einzelherausforderungen „Fachkräftemangel“, „Überbürokratisierung“, „Überregulierung“ und „Hohe Energiepreise“. Obwohl es sich dabei um gesamtwirtschaftliche Herausforderungen handelt, wurden sie von den Experten und in den Umfragen als Hürden für die Skalierung angeführt. Dies ist einerseits damit zu begründen, dass die in diesem Feld genannten gesamtwirtschaftlichen Herausforderungen Schnittmengen mit Herausforderungen in anderen Feldern aufweisen (z. B. „Überbürokratisierung“ und „Unsicherheit bzgl. der Umsetzung der regulatorischen Rahmenbedingungen“). Andererseits weisen ausgewählte Herausforderungen dieses Felds, wie z. B. der Fachkräftemangel, auch einzeln eine hohe Nennungshäufigkeit in den genutzten Umfragen auf (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz der Bundesrepublik Deutschland und ifok GmbH 2023), (Ad-Hoc-Gruppe „Smart Car“ et al. 2023).

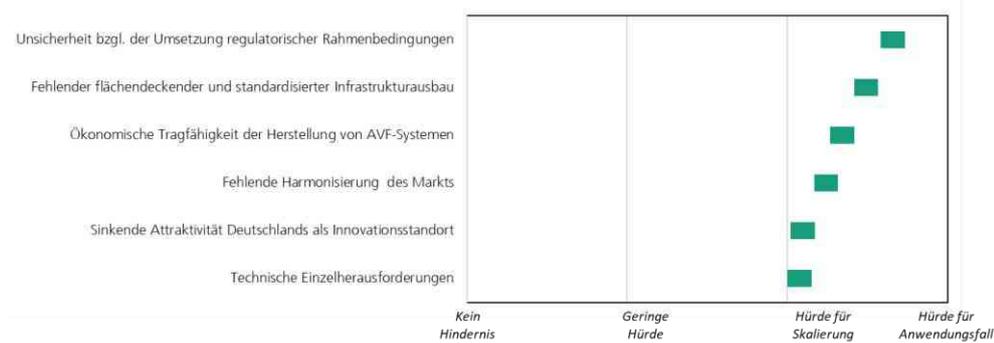
Auf den Plätzen sieben bis zehn der Rangliste werden maßgeblich die gesellschaftlichen und technischen Herausforderungen in Form technischer Einzelherausforderungen, unvollständiger Wertschöpfungsketten, fehlender Nutzerakzeptanz sowie Sicherheitsempfinden aufgeführt, die teilweise nicht mehr als primäre Hürden für die Skalierung von AVF-Systemen wahrgenommen werden. In Bezug auf die Nutzerakzeptanz ist allerdings darauf hinzuweisen, dass diese durchaus für bestimmte Anwendungsbereiche eine hohe Relevanz zukommt (vgl. Abbildung 11). Im Durchschnitt aller Anwendungsfälle sinkt diese aufgrund von Ownership-Betriebsmodellen, bei denen die Akzeptanz der Käufer im Mittelpunkt steht, als auch von ausgewählten Outdoor-Logistikanwendungsfällen, die sich nicht im öffentlichen Raum bewegen. In Bezug auf die technischen Einzelherausforderungen ist darauf hinzuweisen, dass erwartet wird, dass sich weitere relevante Herausforderungen erst mit der Skalierung und Erfahrung der Technologien im Anwendungsfall zeigen werden (vgl. Kapitel 3.2.1). Dementsprechend stellen diese keine direkte Hürde für die Skalierung dar, sondern sind bewertungsbezogen an deren Grenze zu verorten.

Bei der Betrachtung der Ranglisten der einzelnen Anwendungsbereiche „Ownership“, „Sharing“ und „Logistics“ fällt auf, dass es Überschneidungen der fünf erstgenannten Herausforderungsfelder gibt (vgl. Abbildung 8, 9, 11 und 12). Insbesondere das Herausforderungsfeld „Unsicherheit bezüglich der Umsetzung regulatorischer Rahmenbedingungen“ wird in allen drei Bereichen mit Ausnahme der Level-3-Anwendungsfälle (vgl. Abbildung 10) hoch priorisiert, was bei Betrachtung der Absichten potenzieller Level-4-Fahrzeugsystemhersteller, die Fahrsysteme über lokal-definierte ODDs hinweg entwickeln und zulassen möchten, nachvollziehbar ist. Unterschiede ergeben sich insbesondere in der Rangfolge der Herausforderungsfelder beziehungsweise teilweise auch in einzelnen Herausforderungsfeldern, die in der Gesamtbetrachtung nicht unter den Ranglistenplätzen eins bis fünf verortet sind. So werden in den Level-4-Anwendungsfällen des Bereichs „Ownership“ die technischen Einzelherausforderungen als auch der fehlende flächendeckende und standardisierte Infrastrukturausbau als relevant bewertet (vgl. Abbildung 9). Dies ist damit zu erklären, dass vielversprechende und skalierende Anwendungsfälle im Ownership-Bereich eine große ODD realisieren müssen. Dafür ist sowohl eine standardisierte Infrastruktur relevant als auch die Über-

windung mehrerer noch existierender technischer Herausforderungen (z. B. eingeschränkte Sicht- bzw. Lichtverhältnisse und ungünstige Wetterlagen wie Regen, Schnee, Dunkelheit, starkes Gegenlicht, vgl. Kapitel 3.2.1) notwendig. Ebenso wird die ökonomische Tragfähigkeit der Herstellung derartiger Systeme kritisch gesehen. Eine entsprechende Zahlungsbereitschaft der Kunden für automatisierte Systeme bleibt aktuell noch hinter den dafür entstehenden Kosten zurück (vgl. (McKinsey 2023), Kapitel 3.2.3).

Herausforderungen hinsichtlich
der Skalierbarkeit von AVF-
Systemen

Abbildung 9: Rangliste der sechs als am relevantesten identifizierten Herausforderungsfelder für den AVF-Anwendungsbereich „Ownership“ mit Level 4



Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 10: Rangliste der sechs als am relevantesten identifizierten Herausforderungsfelder für den AVF-Anwendungsbereich „Ownership“ mit Level 3



Quelle: Eigene Darstellung

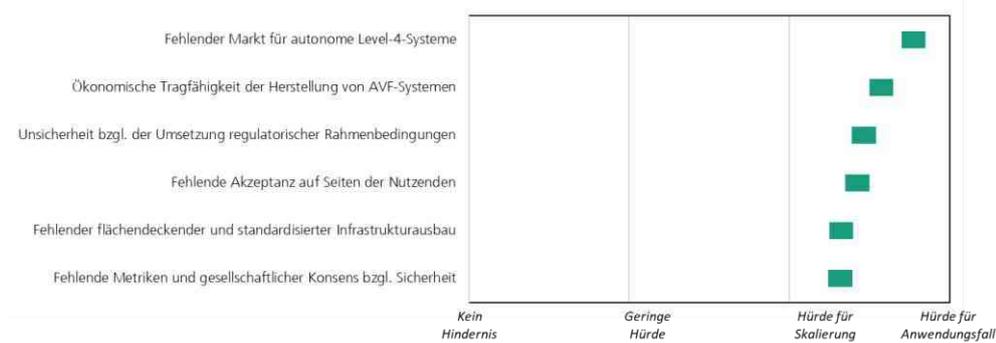
Im Bereich der Level-3-Anwendungsfälle im „Ownership“-Bereich spielt die Unsicherheit bezüglich der Umsetzung der regulatorischen Rahmenbedingungen wie zu erwarten keine Rolle. Insgesamt werden in diesem Kontext die Herausforderungen für die Skalierbarkeit deutlich geringer eingestuft und dafür wertschöpfungsbezogene Herausforderungen aufgrund der teilweise bereits erfolgten Markteinführung deutlich höher bewertet (vgl. Abbildung 10).

Im Bereich „Sharing“ tritt die Unsicherheit bezüglich der Umsetzung der regulatorischen Rahmenbedingungen hinter andere Herausforderungsfelder zurück, da die lokalen Betriebsbereichsgenehmigungen lediglich auf Herstellerseite zu erhöhten Aufwänden in der Skalierung führen. In ähnlicher Weise werden die Herausforderungen bezüglich einer flächendeckenden Infrastruktur aufgrund eines begrenzteren Betriebsbereichs nicht derart hoch bewertet (vgl. Kapitel 3.2.2). Im „Sharing“-Bereich spielen stattdessen die zwei Themenbereiche der Nutzerakzeptanz sowie des noch nicht existierenden Markts für Level-4-Systeme und damit verbundener Kostenstrukturen eine relevante

Rolle (vgl. Abbildung 11). Ersteres liegt darin begründet, dass öffentliche Sharing-Systeme die Nutzerakzeptanz sowohl in Bezug auf die Passagiere als auch in Bezug auf die Verkehrsteilnehmer im öffentlichen Raum sicherstellen müssen, um tragfähige Anwendungsfälle realisieren zu können. In Bezug auf den nicht existierenden Markt für Level-4-Systeme treten hierbei erneut die Kostenstrukturen, die für die Betreiber öffentlicher Flotten relevant sind, sowie die teilweise heterogenen Anforderungen unterschiedlicher Betriebsbereiche in den Mittelpunkt.

Herausforderungen hinsichtlich
der Skalierbarkeit von AVF-
Systemen

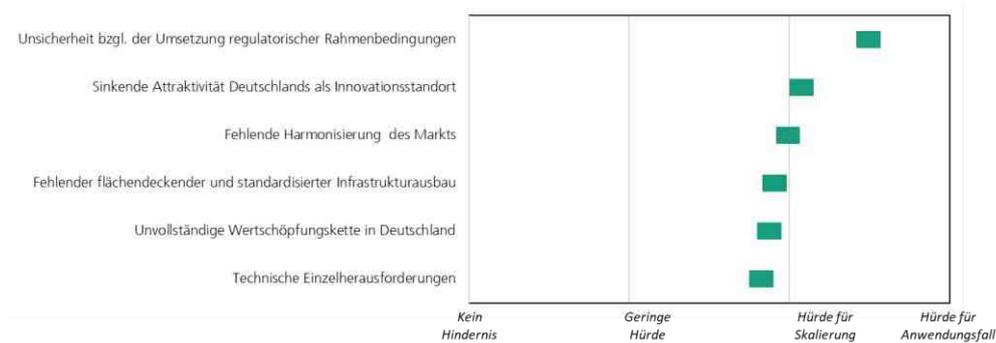
Abbildung 11: Rangliste der sechs als am relevantesten identifizierten Herausforderungsfelder für den AVF-Anwendungsbereich „Sharing“



Quelle: Eigene Darstellung

Der „Logistics“-Bereich weist insgesamt eine geringere Bewertung der Herausforderungen als alle bisher betrachteten Level-4-Systeme auf (vgl. Abbildung 12). 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. Zusätzlich wirkt die rein kommerzielle Ausrichtung der Anwendungsfälle sowie der Mangel an Fahrern (vgl. (Häberle et al. 2023)) auf eine schnellere ökonomische Tragfähigkeit der Anwendungsfälle hin als dies in den Anwendungsbereichen „Sharing“ und „Ownership“ der Fall ist. Dementsprechend weisen die allgemeinen Rahmenbedingungen eines Innovationsstandorts wie der Fachkräftemangel zur Entwicklung der technischen Systeme eine deutlich höhere Relevanz auf. Die fehlende Harmonisierung des Markts wird insbesondere wegen der nur begrenzt vorhandenen Skalierungseffekte in den Kosten als kritisch bewertet. Aufgrund der insgesamt niedriger bewerteten Herausforderungsfelder zeigt sich der „Logistics“-Bereich allerdings als spannender Anwendungsbereich für die Etablierung von Level-3- und Level-4-Systemen.

Abbildung 12: Rangliste der sechs als am relevantesten identifizierten Herausforderungsfelder für den AVF-Anwendungsbereich „Logistics“



Herausforderungen hinsichtlich der Skalierbarkeit von AVF-Systemen

Quelle: Eigene Darstellung

3.4 Zentrale Herausforderungen

Für eine nachhaltige und effiziente Lösung der als relevant identifizierten Herausforderungsfelder müssen grundlegend Rahmenbedingungen geschaffen werden, unter denen sich ein selbsttragendes Wertschöpfungsökosystem für ebenjene Lösungserarbeitung etablieren kann. Ansonsten besteht die Gefahr, dass Lösungen unter Förderbedingungen zwar erarbeitet und umgesetzt werden, diese allerdings im Verbund nicht wirken beziehungsweise die Lösung weiterer Herausforderungen damit nicht anstoßen. Einzelherausforderungen würden zwar überwunden, skalierungsfähige Anwendungsfälle allerdings in Summe nicht befähigt. Die Identifikation zentraler Herausforderungen zielt daher genau darauf ab, diejenigen Herausforderungen zu identifizieren, die für die Schaffung derartig grundlegender Rahmenbedingungen überwunden werden müssen.

Die Einzelherausforderungen können grundlegend in aktivitätshemmende und aktivitätshemmende Herausforderungen untergliedert werden. Herausforderungen, die durch ihre Existenz Aktivitäten zu deren Überwindung durch einzelne Akteure oder Akteursverbände hervorrufen, werden als aktivitätshemmende Herausforderungen bezeichnet. Aktivitätshemmende Herausforderungen behindern hingegen die Entstehung von Akteursverbänden oder konkreten Aktivitäten zur Lösung ebendieser Herausforderungen (vgl. z. B. (Lengsfeld 2023)). Letztere müssen zur Schaffung der grundlegenden Rahmenbedingungen überwunden werden.

Hierfür wurden die atomaren Einzelherausforderungen einer Metaanalyse bezüglich ihrer Herausforderungstreiber unterzogen. Herausforderungstreiber beschreiben Gründe für die Existenz der Herausforderung, die in der Wahrnehmung beziehungsweise Motivation der Akteure begründet sind. Mögliche Herausforderungstreiber sind z. B. Ressourcenbeschränkungen, Kompetenzmängel, Organisationshindernisse, aber auch Ökosystembedingungen wie Investitionsrahmenbedingungen. Herausforderungstreiber sind nicht überschneidungsfrei. Eine Einzelherausforderung kann auch mehreren Herausforderungstreibern zugeordnet werden. Bei den im Rahmen dieser Studie analysierten Einzelherausforderungen sind zwei Treiber besonders häufig vorhanden:

- Unsicherheitsbedingte Herausforderungen** bezeichnen Einzelherausforderungen, die aufgrund einer Unsicherheit der Akteure aktivitätshemmend wirken. 63 % der atomaren Einzelherausforderungen beziehen sich auf derartige Unsicherheiten der Akteure, die fehlendem Wissen über die aktuelle oder zukünftige Ausprägung von Rahmenbedingungen entstammen (vgl. (Block 2023)). Beispiele hierfür sind die Unsicherheiten bezüglich der Umsetzung regulatorischer Rahmenbedingungen

oder das fehlende Praxiswissen zur ökonomischen Tragfähigkeit einzelner Anwendungsfälle.

- **Systemische Herausforderungen** sind Herausforderungen, die ein koordiniertes Wertschöpfungsnetzwerk an Akteuren zur Bewältigung benötigen. Circa 42 % der Einzelherausforderungen können diesem Treiber zugeordnet werden. Beispiele für systemische Herausforderungen sind die Erschließung des bislang nicht existenten Markts für Level-4-Systeme sowie diejenigen Herausforderungen, die eine Standardisierung diverser Ökosystembestandteile über mehrere Akteure adressieren.

Weitere Herausforderungstreiber hatten eine deutlich niedrigerer Nennungshäufigkeit in der Metaanalyse.

Die Kombination der beiden genannten Herausforderungstreiber weist auf grundlegende Defizite sowie kritische Wirkzusammenhänge hin: Einerseits fehlt es den Akteuren an Wissen über die aktuelle oder zukünftige Ausprägung von Rahmenbedingungen (unsicherheitsbedingte Herausforderungen). Andererseits führt dieses fehlende Wissen zu einer Deadlock-Situation in Bezug auf die Bewältigung systemischer Herausforderungen. Dementsprechend können drei zentrale Herausforderungen in Form einer Herausforderungswirkkette identifiziert werden, die für die Schaffung zielführender Rahmenbedingungen durch entsprechende Handlungen überwunden werden müssen (vgl. Abbildung 13).

Abbildung 13: Die drei zentralen Herausforderungen zur Schaffung zielführender Rahmenbedingungen



Quelle: Eigene Darstellung

Ausgangspunkt der Herausforderungskette ist die Herausforderung, dass zielführende Rahmenbedingungen – z. B. in Form der AFGBV – von den Akteuren generell als vorhanden, deren Umsetzung allerdings auch als unsicher eingestuft wird (Zentrale Herausforderung 1). 29 % aller unsicherheitsbezogenen Einzelherausforderungen entfallen auf den Bereich der Umsetzung vorhandener Regulatorik (vgl. Kapitel 3.2.2 und 3.3). Im technischen Bereich ist die Unsicherheit insbesondere durch fehlendes Erfahrungswissen bezüglich großflächiger und kommerzieller Level-4-Anwendungsfälle begründet (35 % aller unsicherheitsbezogenen Herausforderungen). Marktbezogen entsteht die Unsicherheit dadurch, dass ein realer Markt und damit konkrete Erfahrungen bislang nicht vorhanden sind. Unsicherheiten bezüglich des Geschäftsmodells (z. B. Kundenattraktivität, Rentabilität) können nicht reduziert werden. Insgesamt machen die marktbezogenen Unsicherheiten circa 36 % aller unsicherheitsbezogenen Herausforderungen aus. Hinzu kommt die marktbezogene Unsicherheit, ob verbleibende technische und regulatorische Hürden überwunden werden, die Harmonisierung des Markts gelingt und das notwendige Ökosystem für AVF-Systeme entstehen kann.

Aufgrund der vorhandenen, aber unsicheren Rahmenbedingungen (Zentrale Herausforderung 1) entsteht ein individuelles Risiko für die an der AVF-Wertschöpfung beteiligten Akteure. Einerseits sind nach wie vor hohe Investitionen z. B. in die Entwicklung, aber auch Kommerzialisierung der AVF-Systeme und ihrer Komponenten zu tätigen (vgl. Kapitel 3.2.1). Zur Überwindung dieser Herausforderungen sind dabei unter anderem Allianzen mit anderen Akteuren notwendig (vgl. systemische Herausforderungen).

Herausforderungen hinsichtlich
der Skalierbarkeit von AVF-
Systemen

Hinzu kommt, dass die Märkte für die AVF-Systeme (noch) nicht harmonisiert sind, was zu hohen Transfer- und Integrationskosten der entwickelten AVF-Systeme führt. Andererseits ist der Markt, insbesondere im Bereich der Level-4-Anwendungen, noch nicht etabliert. Im Bereich der Level-3-Anwendungen lassen sich nur vereinzelt Geschäftsmodelle identifizieren, für die ausreichende Zahlungsbereitschaft realisiert wurde (vgl. Kapitel 2 und 3.2.2). Für die Akteure entsteht damit das Risiko von Trittbrettfahrer-Effekten und einer First-Mover-Disadvantage (vgl. (Hietala 2017), (Klusak et al. 2022), (Feess 2018), (Boulding und Christen 2001)): Es besteht die Gefahr, dass sich einzelne Akteure nicht an der Bewältigung systemischer Herausforderungen (z. B. im Bereich der Standardisierung oder Markterschließung) beteiligen und trotzdem davon profitieren können. Dies könnte zum Beispiel geschehen, indem derartige Akteure erst in den etablierten Markt eintreten und von den öffentlich einsehbaren Erfahrungen der First-Mover-Akteure profitieren, ihre Investitionen und Anforderungen entsprechend anpassen und somit ihr Risiko bezüglich des Geschäftsmodells senken (Trittbrettfahrer-Effekt, vgl. (Feess 2018)). Damit entstehen für die First-Mover-Akteure einerseits hohe Kosten für die Überwindung der Herausforderungen, andererseits aber auch eine First-Mover-Disadvantage, da andere Akteure als spätere Wettbewerber geringere Kosten und Risiken zu tragen haben (vgl. (Boulding und Christen 2001)). Dies führt abschließend dazu, dass sich das Wertschöpfungsnetzwerk nicht etablieren kann und es zu einer pareto-ineffizienten Nicht-Bereitstellung von notwendigen Ressourcen zur Überwindung der Herausforderungen kommt (Zentrale Herausforderung 2).

Im Status Quo lässt sich daher beobachten, dass keiner der deutschen Akteure im Level-4-Bereich den Impuls zur Entstehung des Wertschöpfungsnetzwerks und damit zur Bewältigung systemischer Herausforderungen setzt (Zentrale Herausforderung 3). Die Auswertung der Experteninterviews zeigt zwar, dass die Bereitschaft der Akteure zur Kooperation grundsätzlich gegeben scheint. Auch in den ausgewerteten Quellen (vgl. (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz der Bundesrepublik Deutschland und ifok GmbH 2023), (Ad-Hoc-Gruppe „Smart Car“ et al. 2023)) wird die Notwendigkeit eines Impulses zur Umsetzung der Automatisierung in Deutschland hervorgehoben. Eine Umsetzung großflächig skalierbarer Level-4-Anwendungsfälle lässt sich bislang aufgrund der aufgeführten Risiken von deutschen Akteuren oder in Deutschland nicht beobachten (vgl. Kapitel 2).

Eine ähnliche Situation ergab sich historisch im Bereich der Elektromobilität, in der Tesla Motors als neu eintretender Wettbewerber die entsprechenden Impulse zur beschleunigten Entstehung eines Marktes, des Wertschöpfungsnetzwerks und der Einführung von Elektrofahrzeugen setzte und damit etablierte Marktteilnehmer incentivierte, trotz Risiko in die entsprechenden Technologien zu investieren (Daum 2021). Induktiv ist daher zu folgern, dass, solange einerseits die Unsicherheiten und damit Risiken bestehen bleiben und andererseits Impulse zur Entstehung des Wertschöpfungsnetzwerks fehlen, die notwendigen Anwendungsfälle nicht entstehen können, die wiederum zur Beseitigung der Unsicherheiten notwendig sind. Es entsteht die bereits erwähnte Dead-lock-Situation.

Die Wahrscheinlichkeit zur Entstehung eines derartigen Impulses wird für den Standort Deutschland als gering eingeschätzt. Einerseits setzen bereits aktuell andere Regionen, wie zum Beispiel China und die USA, entsprechende Impulse (vgl. Kapitel 2). Andererseits fehlt es bislang in Deutschland an einer Förderung von AVF-Systemen nahe der Marktreife (vgl. (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz der Bundesrepublik Deutschland und ifok GmbH 2023), (Ad-Hoc-Gruppe „Smart Car“ et al. 2023)). Verstärkend kommt ein sinkendes Vertrauen in den Innovationsstandort Deutschland hinzu (vgl. Kapitel 3.2.3), was die Wahrscheinlichkeit einer Investition eines risikobereiten Akteurs als Impulsgeber weiter senkt. Vorteilhaft gegenüber anderen Weltregionen ist hingegen der regulatorische Rahmen, der weltweit erstmalig den Regelbetrieb von

AVF-Systemen ermöglicht, sowie die vorhandene Akteursstruktur im Hersteller- und Zuliefererbereich (vgl. Kapitel 2).

Bei der Verbreitung von AVF-Systemen in Deutschland scheinen die üblichen Marktmechanismen daher nicht ausreichend. Die in Kapitel 2 für Deutschland charakterisierten Akteursstrukturen bedingen zusammen mit dem in Europa vorhandenen Wirtschaftssystem die dargestellte Wirkkette an zentralen Herausforderungen und schaffen damit eine einzigartige Herausforderungssituation. In China übernimmt der Staat beispielsweise eine orchestrierende Rolle zur Entstehung von urbanen AVF-Systemen, unter anderem über entsprechende Staatskonzerne, regulatorische und standardisierende Eingriffe sowie über finanzstarke Förderprogramme (vgl. (Grupp 2022; Krempf 2021; Qingdao 2022; Kühl 2022; Abele 2023) und Kapitel 2). Vorreiter automatisierter Systeme in den USA sind Unternehmen, die zu sehr finanzstarken Konzernen gehören und die das damit einhergehende Risikokapital aufbringen können (vgl. (tagesschau.de 2023) und Kapitel 2). Die Akteurslandschaft der deutschen Automobilindustrie ist dagegen geprägt von unterschiedlichen Akteuren diverser Größe, die im Unterschied zu den Konzernen der genannten Länder nicht über vergleichbares Risikokapital oder staatliche Unterstützung verfügen. Dies ist nicht als Nachteil des europäischen Wirtschaftssystems zu verstehen, bedingt allerdings gemeinsam mit der Akteursstruktur die spezifischen, zentralen Herausforderungen.

Herausforderungen hinsichtlich
der Skalierbarkeit von AVF-
Systemen

4 Handlungsfelder zur Bewältigung der Herausforderungen

Kapitel 3.4 zeigt auf, dass für eine nachhaltige und effiziente Lösung der als relevant identifizierten Herausforderungsfelder die zentralen Herausforderungen adressiert werden müssen, um ein selbsttragendes Wertschöpfungsökosystem für ebene Lösungserarbeitung zu etablieren. Dementsprechend müssen angestrebte Handlungen nicht nur besonders relevante Einzelherausforderungen überwinden, sondern vor allem ...

- ... regulatorische, technische und marktbezogene Unsicherheiten beseitigen und damit die Risiken für die Akteure im Wertschöpfungsnetzwerk senken,
- ... einen Katalysator zur Entstehung des Wertschöpfungsnetzwerks einbringen sowie
- ... einen Impuls nahe Marktreife setzen und Anwendung demonstrieren,

... um die zentralen Herausforderungen zu beseitigen.

Die zentralen Herausforderungen beschreiben allerdings eine Meta-Ebene der Einzelherausforderungen, die zunächst unabhängig von einer Realisierung spezifischer AVF-Systeme durch konkrete Maßnahmen ist. Die folgenden Handlungsfelder und -empfehlungen sind daher allgemeiner Natur in Bezug auf die Befähigung der Akteure zur Entstehung von AVF-Systemen beliebiger Ausprägungen zu verstehen. Dementsprechend muss für eine Umsetzung der Maßnahmen eine Einbettung der Handlungsempfehlungen in den Kontext der Mobilitätswende und damit in ein gesellschaftlich tragfähiges Zukunftsbild des Mobilitätssystems erfolgen. Die Umsetzung der Handlungsfelder und -empfehlungen wird daher flankiert von einer Steigerung der Innovationsfähigkeit, einem klaren Bekenntnis der Regierung sowie von einem gesellschaftlichen Dialog darüber, welche Ausprägungen der AVF-Systeme für ein gesellschaftlich tragfähiges Verkehrssystem denn konkret hervorgebracht und damit durch die Handlungen gefördert werden sollen.

Abbildung 14: Handlungsfelder, um Deutschland zum Innovationsstandort für das automatisierte und vernetzte Fahren zu machen



Quelle: Eigene Darstellung

Dementsprechend ergeben sich abschließend fünf konkrete Handlungsfelder, die von drei unterstützenden Bausteinen begleitet werden (vgl. Abbildung 14). Zentrale Handlungsfelder sind die Förderung skalierungsfähiger Anwendungsfälle nahe Marktreife (Kapitel 4.1) sowie eine nationale Koordinationsstelle automatisiertes und vernetztes

Fahren (Kapitel 4.2), die die Kooperationsrisiken senken sowie zur Beseitigung von praktischen Hürden und der Senkung der Unsicherheit beitragen sollen. Begleitet werden diese von der Etablierung bundesweit einheitlicher und unbürokratischer Genehmigungsprozesse (Kapitel 4.3) sowie der Bewältigung weiterer, relevanter Einzelherausforderungen (Kapitel 4.4). Für die großflächige Skalierung wird die Entwicklung eines harmonisierten Markts empfohlen (Kapitel 4.5). Abgeschlossen werden die Handlungsfelder mit den drei unterstützenden Bausteinen: Dem bereits als notwendig beschriebenen, gesellschaftlichen Dialog, der Formulierung eines klaren Bekenntnisses der Regierung und der Befähigung des Innovationsstandorts Deutschland (vgl. Kapitel 4.6).

Im Bereich der Level-3-Systeme wurden lediglich die Herausforderungsfelder des Infrastrukturausbaus, der Wirtschaftlichkeit und der sinkenden Attraktivität Deutschlands als Innovationsstandort als Hürden für die Skalierbarkeit bezeichnet (vgl. Abbildung 10). Die Handlungsempfehlungen der Kapitel 4.1, 4.2 und 4.6 adressieren daher schwerpunktmäßig, aber nicht ausschließlich, Herausforderungen der Skalierbarkeit im Kontext von Level-4-Systemen.

4.1 Förderung skalierungsfähiger Anwendungsfälle nahe Marktreife

Die Förderung skalierungsfähiger Anwendungsfälle hat zum Ziel, die Deadlock-Situation der Herausforderungskette aufgrund zu hoher Unsicherheit, existierender Kooperationsrisiken und fehlender Impulse aufzulösen (vgl. Kapitel 3.4), indem lokal begrenzte, kommerzielle AVF-Anwendungsfälle realisiert werden, die anschließend inkrementell transferiert, ausgerollt und damit skaliert werden. Diese Anwendungsfälle dürfen daher primär nicht die Bewältigung noch vorhandener, technischer Einzelherausforderungen adressieren, wie dies in Forschungsprojekten und Testfeldern der Fall ist (vgl. z. B. (KVV 2023)). Die notwendigen technischen Voraussetzungen für einen prinzipiellen Betrieb müssen vielmehr gegeben sein. Die Anwendungsfälle starten dementsprechend mit dem kommerziellen Realbetrieb und fokussieren darauf aufbauend die Entstehung und den Transfer von Erfahrungswissen aus dem Regelbetrieb bezüglich Geschäftsmodell, Standardisierungsnotwendigkeiten, existierenden regulatorischen, bürokratischen und infrastrukturellen Hürden sowie Corner Cases und damit verbundenen technischen Herausforderungen. Die erfahrungsbasierte Unsicherheit aus Kapitel 3.4 wird gesenkt.

Die Überwindung der noch existierenden regulatorischen, bürokratischen und infrastrukturellen Hürden wird dabei durch die nationale Koordinationsstelle „Automatisiertes und Vernetztes Fahren“ unterstützt (vgl. Kapitel 4.2). Ein Wissenstransfer zwischen unterschiedlichen Anwendungsfällen bezüglich der Corner Cases, Standardisierungsnotwendigkeiten und des Geschäftsmodells findet durch die Koordinationsstelle statt, die wiederum als Werkzeuge z. B. auf eine zentrale Datenbank derartiger Informationen zurückgreifen kann (vgl. Kapitel 4.4). Nach erfolgreicher lokaler Implementierung sollte die schrittweise Skalierung des Anwendungsfalls auf andere Gebiete mit ähnlicher ODD mit abnehmender Förderung der ausgewählten Partner erfolgen. Die Skalierung des Anwendungsfalls stellt dabei allerdings keine Option, sondern eine Notwendigkeit des Anwendungsfalls dar und muss dementsprechend bereits zu Projektbeginn festgelegt und entsprechende Partner der zu erweiternden Gebiete in die Umsetzung integriert werden. Dementsprechend muss eine Auswahl relevanter Anwendungsfälle, die zuerst lokal und kommerziell gefördert implementiert werden, prinzipiell aber skalierbar sind, erfolgen. Passende Anwendungsfälle sind beispielsweise in Kapitel 2.3 identifiziert und beschrieben. Neben der reinen Betrachtung des Reifegrads sollten dabei Wirtschaftlichkeit, Kundennutzen sowie Neuheitsgrad berücksichtigt werden. Da die skalierungsfähigen Anwendungsfälle zum Teil staatlich gefördert werden sollen, empfiehlt sich die Umsetzung von Anwendungsfällen mit breiterem, gesellschaftlichem

Nutzen, wie dies z. B. im Bereich „Sharing“ der Fall ist. Die Förderung bestimmter Automatisierungsgrade kann dabei implizit über die Auswahl der passenden Anwendungsfälle erfolgen, sollte insgesamt vor dem Hintergrund des Innovationsstandorts allerdings einen Schwerpunkt im Bereich der Level-4-Automatisierung aufweisen. Die Projektkonsortien zur Umsetzung der Anwendungsfälle sollten das notwendige Wissen, Produkte und Dienstleistungen zur unmittelbaren, kommerziellen Umsetzung der Anwendungsfälle mitbringen und sich nicht nur auf eine spezifische Region beschränken.

Die Förderung der Anwendungsfälle verfolgt das Ziel, das Kooperationsrisiko der beteiligten Akteure zu senken und damit deren Mitwirkung an der Umsetzung der Anwendungsfälle zu ermöglichen. Dementsprechend muss die Art und Höhe der Förderung – oder alternativ einer finanziellen Absicherung – auch nicht auf eine vollumfängliche wirtschaftliche Stützung der Anwendungsfälle ausgelegt sein, sondern lediglich die Risiken, die die Akteure mit einer Beteiligung an der Anwendungsfallumsetzung eingehen, kompensieren. Die dazu zur Verfügung stehenden Instrumente sind vielfältig und reichen von einer Zufinanzierung des Fahrpreises bei „Sharing“-Angeboten (vgl. z. B. (Markt Murnau 2023)), einer Förderung der Betriebskosten oder der zugesicherten Forschungsförderung zur Bewältigung aufkommender, aber bislang unbekannter Hürden (vgl. z. B. projektbezogene Forschungsförderung oder (König 2023)) bis hin zu andersartigen Risikoausgleichen wie beispielsweise Sonderkreditkonditionen oder Infrastrukturbereitstellung. Die genaue Ausprägung ist dabei vor dem Hintergrund der Förderziele, der beteiligten Akteure, des Anwendungsfalls und der Haushaltssituation abzuwägen. Grundsätzlich zu beachten ist, dass die Industrie in Deutschland nur vorwettbewerblich gefördert werden kann und entsprechende Ausschreibungsvorschriften (z. B. in Bezug auf EU-weite Ausschreibungen) gelten. Ein Teil der Förderung wird allerdings in finanzieller Form an die entsprechenden Regionen (z. B. zum Infrastrukturaufbau) gehen, in denen die Anwendungsfälle pilotiert oder skaliert werden. Für diese gelten entsprechende industriebezogene Vorschriften nicht. Zusätzlich bietet das genannte Instrumentarium hierbei auch ausreichende Möglichkeiten einer Risikokompensation im legalen Rahmen (z. B. Ausschreibung eines AVF-basierten Systems im ÖPNV). Im Bereich der Level-3-Systeme wird außerdem von einer lediglich geringen Förderung, maßgeblich indirekt durch einen passenden Infrastrukturausbau ausgegangen (vgl. Abbildung 10), da entsprechende Systeme über das Luxussegment eingeführt, bereits im Markt vorhanden sind. Da die Förderung lediglich die Risiken, die die Akteure mit einer Beteiligung an der Anwendungsfallumsetzung eingehen, kompensieren soll, sollte die Förderung der Partner außerdem mit zunehmender Skalierung des Anwendungsfalls sinken, da sich die Risiken aufgrund steigendem Erfahrungswissens mindern.

Die Anwendungsfälle bilden im Konstrukt der Handlungsfelder somit den Nukleus zur Entstehung eines funktionierenden Wertschöpfungsnetzwerks.

4.2 Aufbau einer Nationalen Koordinationsstelle „Automatisiertes und Vernetztes Fahren“

Die Nationale Koordinationsstelle „Automatisiertes und Vernetztes Fahren“ (kurz: Nationale Koordinationsstelle AVF¹) soll als katalysierende Entität zur Entstehung der notwendigen Rahmenbedingungen und zur Abstimmung der relevanten Akteure dienen. Ihr werden in diesem Kontext maßgeblich drei Aufgaben zugewiesen:

¹ Eine Anpassung des Namens zur besseren Ausdrucksweise der Inhalte ist angeraten.

1. Unterstützung der Anwendungsfälle zur Beseitigung praktischer Hürden,
2. Wissenstransfer zwischen Anwendungsfällen und zwischen Akteuren,
3. Bereitstellung einer Koordinations- und Abstimmungsplattform für die Akteure.

Die Unterstützung der skalierbaren Anwendungsfälle (vgl. Kapitel 4.1) zur Überwindung konkreter Umsetzungshürden beschreibt die operative Ausrichtung der Nationalen Koordinationsstelle AVF. Sie gibt unmittelbare und langfristige Handlungsbedarfe aus den Anwendungsfällen an die jeweiligen Entitäten im Bereich der Regulatorik, Bürokratie, Forschungsvernetzung und -förderung, gesellschaftlicher Dialog sowie Normung und Standardisierung weiter und verfolgt deren zeitnahe Umsetzung in den jeweiligen Gremien. Dafür muss sie einerseits mit einem starken politischen Mandat ausgestattet sein, um eine zielgerichtete und effiziente Umsetzung innerhalb der jeweiligen Entitäten vorantreiben zu können. Andererseits muss die Nationale Koordinationsstelle AVF über begrenzte finanzielle Mittel verfügen, um die Überwindung kleinerer Hürden z. B. aus dem Bereich der Normung und Standardisierung oder dem technischen Bereich selbst schnell und unbürokratisch fördern zu können¹. Ebenso unterstützt sie über ihre Vernetzungsfunktion bei der Auswahl der Partner und Anwendungsfälle in der Vorbereitungs- sowie Umsetzungsphase.

Mittelfristig soll die Nationale Koordinationsstelle AVF den Wissenstransfer zwischen den Anwendungsfällen und Wissensträgern im AVF-Wertschöpfungsnetzwerk und den zugehörigen Ökosystemen für die Weiterentwicklung der Anwendungsfälle befördern. Konkret erfolgt dies durch die Wissenserhebung, -aggregation und -dissemination aus den Anwendungsfällen. Best Practices und Lessons Learned sollen in qualitativer Form von den Stakeholdern der Anwendungsfälle (z. B. Kommunen, Unternehmen) als Gegenleistung zur Förderung eingesammelt und in Austauschrunden mit weiteren Betriebsregionen weitergegeben werden. Zusätzlich sollten von den Anwendungsfällen Daten bezüglich der Corner Cases, Infrastruktur und Sicherheit in zentralen Datenbanken zur Verfügung gestellt werden müssen (vgl. Kapitel 4.4), um damit einerseits den Aufbau dieser Datenbanken zu befördern und darüber hinaus eine Dissemination des gewonnenen Wissens zu erreichen. Die Datenhoheit und -verwaltung muss hierzu nicht bei der Nationalen Koordinationsstelle AVF liegen, sondern kann auch bei anderen Stakeholdern (z. B. KBA) verortet werden. Relevant ist allerdings, dass die Daten der Nationalen Koordinationsstelle zur Auswertung des Stands der Anwendungsfälle, zur Bewertung der existierenden Hürden und zur Wissensdissemination zur Verfügung stehen. Abschließend gehört die Information der Anwendungsfälle über bislang geförderte AVF-Projekte sowie deren Erkenntnisse zur taktischen Aufgabe der Nationalen Koordinationsstelle AVF.

Für eine strategische Ausrichtung des AVF-Innovationsstandorts Deutschland soll die Nationale Koordinationsstelle AVF eine Koordinations- und Abstimmungsplattform für die Akteure und Anwendungsfälle bereitstellen. Diese Koordinations- und Abstimmungsplattform bedient dabei den erörterten Bedarf der Wissensdissemination. Des Weiteren dient die Plattform aber auch der neutralen Abstimmung und Koordination der unterschiedlichen AVF-Fördervorhaben und der Akteure (vgl. nationale Austauschgremien wie z. B. ETA) zur weiteren Skalierung der Anwendungsfälle in einem neutralen und offenen, aber rechtlich abgesicherten Rahmen.

¹ Konkrete Beispiele für neue Arten der Förderausschreibung werden aktuell durch DATIpilot der Deutsche Agentur für Transfer und Innovation (DATI) erprobt und können, bei positiver Evaluation, eventuell auch in diesem Kontext Anwendung finden.

Zur Erfüllung dieser Aufgaben ist die Nationale Koordinationsstelle AVF organisatorisch als eine konsequente Aggregation, Weiterentwicklung und Stärkung vorhandener Austauschgremien zu verstehen, wie zum Beispiel der Expertenkreis Transformation der Automobilwirtschaft (spezifisch z. B. die Ad-hoc-Gruppe Smart Car), der Runde Tisch „Automatisiertes Fahren“, diverse Ansprechstationen beim KBA und die Kommunikations- und Koordinierungsplattform automatisiertes Fahren (KOAF). Die Stärkung erfolgt insbesondere in Bezug auf die Möglichkeit, operativ in den Anwendungsfällen festgestellte Hürden zu beseitigen und entsprechende Vorhaben (teilweise eigenfinanziert oder gefördert) anzustoßen. Unterstützt wird dies durch eine konkrete Anbindung an die relevanten Anwendungsfälle, eine ministeriumsübergreifende Verortung sowie personelle Unterstützung zur Bearbeitung der Aufgaben und fachlichen Betreuung der Anwendungsfälle. Demgegenüber steht in diesem Falle dann aber auch die Verantwortung für den Erfolg und die Skalierbarkeit der Anwendungsfälle, die bei der Koordinationsstelle zu verorten sind; insbesondere im Bereich der Beseitigung entsprechend identifizierter Hürden. Die Ausrichtung der der Nationalen Koordinationsstelle sollte dabei sowohl auf die Skalierbarkeit von Level-3- als auch von Level-4-Systemen ausgerichtet sein, wobei vor dem Hintergrund der Herausforderungshöhe mehr Aktivitäten im Bereiche der Level-4-Systeme zu erwarten sind (vgl. Kapitel 3.3).

Zur Erfüllung der Aufgaben ist ein kurzzyklisches, unbürokratisches Handeln durch effiziente Prozesse und Strukturen der Koordinationsstelle AVF zentral. Einerseits ist dies praktisch notwendig, um die skalierbaren Anwendungsfälle in der Beseitigung der Hürden unterstützen zu können, ohne den Erfolg der Anwendungsfälle durch zu lange, bürokratische Prozesse zu gefährden. Andererseits dient dies der Vertrauensbildung in den Innovationsstandort Deutschland, indem die internationale Wettbewerbsposition gegenüber Ländern, in denen weniger regulatorische Rahmenbedingungen gelten beziehungsweise ein schnelleres, staatliches Handeln erfolgt, gestärkt wird und dadurch die Wahrnehmung sowie Wahrung technischer und regulatorischer Wissensvorsprünge gelingen kann. Insgesamt sollte die Nationale Koordinationsstelle AVF daher von der operativen Betreuung und Überprüfung der Anwendungsfälle im Sinne eines Projektträgers entkoppelt sein und gegenüber den umsetzenden Akteuren als Befähiger für die Anwendungsfälle wahrgenommen werden.

Dementsprechend stellt die Verortung und Organisationsform der Nationalen Koordinationsstelle AVF eine Herausforderung dar. Einerseits muss sie mit einem starken politischen Mandat ausgestattet sein, um die Umsetzungshürden überwinden oder deren zeitnahe Lösung beauftragen zu können. Gleichzeitig muss sie aus den zuvor genannten Gründen eine glaubhaft unbürokratische Unterstützung und Vorgehensweise aufweisen, was einer ministeriumsinternen Verortung der Organisation widerspricht. Zusätzlich muss sie als neutrale Entität bezüglich der zur Umsetzung involvierten Akteure (z. B. Industrie, Prüfgesellschaften, Politik, Kommunen) fungieren, um die Einzelinteressen neutral unter dem Ziel der bestmöglichen Umsetzung der Anwendungsfälle zu beurteilen. Als mögliche Verankerungspunkte für die Nationale Koordinationsstelle AVF ergeben sich daher lediglich die diversen Optionen einer ministeriumsnahen, aber eigenständigen Entität (z. B. Agentur) oder die Verortung an einem bundesgeförderten Institut oder Amt, dem eine unbürokratische Arbeitsweise zugetraut wird. Bezüglich der Organisationsform ist die Lenkung über eine Auswahl hochrangiger Mitglieder der in die Wertschöpfung involvierten Akteure anzustreben, die die Relevanz der Anwendungsfälle über die eigene Entscheidungskompetenz und das Netzwerk in die jeweiligen Organisationen, mit denen die Nationale Koordinationsstelle AVF im Austausch steht, tragen können.

Die Finanzierung der Nationalen Koordinationsstelle kann durch unterschiedliche Modelle erfolgen. So könnte beispielsweise eine Förderung der Anwendungsfälle durch Nutzung entsprechender AVF-Fördermittel aus den Ministerien zustande kommen.

Budgets zur Überwindung der noch unbekanntenen Hürden können durch eine Fokussierung der Forschungsförderung auf noch bestehende Herausforderungen und auf auswirkungstarke Themenfelder gewonnen werden (vgl. z. B. Kapitel 3.2 und 4.4). Zusätzlich zu einer öffentlichen Förderung wäre eine Finanzierung durch die eingebundenen Unternehmen denkbar. Ein geeignetes Konzept hierzu müsste allerdings noch detailliert erarbeitet werden, um etwaigen Nachteilen, wettbewerbsrelevanten Verzerrungen und kartellrechtlichen Risiken entsprechend entgegenzuwirken. Der Budgetbedarf der Organisation selbst wird als eher gering eingeschätzt. Zum einen sollten die beratenden Gremien der Austauschplattform und Wissensdissemination sowie deren Mitglieder lediglich angeleitet, selbst allerdings unentgeltlich aufgrund des Vernetzungsangebots mitwirken. Der Personalbedarf beschränkt sich damit auf ein agiles Team zur Unterstützung der Wissensdissemination und der Anwendungsfälle. Des Weiteren können infrastrukturell notwendige Voraussetzungen bei anderen Akteuren verortet werden, die bereits über entsprechende Budgets hierfür verfügen (z. B. Datenbank zu den Corner Cases beim KBA).

4.3 Definition bundesweit einheitlicher, unbürokratischer Genehmigungsprozesse

Mit der AFGBV wurde bereits ein umfänglicher Rechtsrahmen geschaffen, der die Einführung des automatisierten Fahrens in Deutschland im Regelbetrieb ermöglicht. Dies befähigt die deutsche Industrie grundsätzlich, international eine technologische Vorreiterrolle einzunehmen. Die identifizierten Herausforderungen beziehen sich dabei insbesondere auf Unsicherheiten und Befürchtungen in der untergesetzlichen Umsetzung des Rechtsrahmens oder adressieren die Weiterentwicklung und Verbreitung dieses Rahmens auf der europäischen und schließlich internationalen Ebene (vgl. Kapitel 3.2.2). Die folgend geäußerten Handlungsempfehlungen sind daher als Hinweise für die teilweise noch ausstehende Umsetzung zu verstehen und beschreiben nicht unmittelbar einen aktuellen Missstand, sondern vielmehr einen gewünschten Idealzustand.

Die Handlungsempfehlungen zielen in einem ersten Schritt darauf ab, die benannte Unsicherheit zu reduzieren und den Prozess der Betriebserlaubnis sowie der Betriebsbereichsgenehmigung anwendungsgetrieben zu formulieren. Ersterer ist bereits grundsätzlich beim KBA definiert (vgl. (KBA 2023b)), praktisch allerdings bislang noch nicht erprobt oder von einem Hersteller durchlaufen worden. Der praktische Rahmen kann daher anwendungsgetrieben erst beim Durchlauf definiert werden. Flankierend dazu können trotzdem bereits jetzt unterstützende Prozesse zur Nachweisführung im Bereich bestimmter Verfahrenserfordernisse entwickelt werden (vgl. folgender Absatz). Dies betrifft ebenso die anwendungsgetriebene Definition des Umgangs mit wiederkehrenden Updates am Fahrzeug (z. B. der Software) (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz der Bundesrepublik Deutschland und ifok GmbH 2023), (Ad-Hoc-Gruppe „Smart Car“ et al. 2023). In Bezug auf die Betriebsbereichsgenehmigung gibt es bislang in keinem Bundesland offiziell herausgegebene Prozesse und Vorgehen (Tagespiegel 2023; Steininger 2022). Um einer zu bürokratischen Definition auf beiden Ebenen entgegenzuwirken, empfiehlt sich ein praxisbezogener Ansatz, der die relevanten Prozesse, Kriterien und Nachweise schrittweise und anwendungsnah nach den Genehmigungsbedarfen der Anwendungsfälle formuliert und anschließend transparent über die Nationale Koordinationsstelle AVF kommuniziert.

Inhalt der entsprechenden Prozesse sollte dabei – komplementär zu den Kriterien, Nachweisen und Prozessschritten – die Überprüfung der Fahrsystemkompetenz (z. B. szenariobasiert) sein, da zur Realisierung der entsprechenden AVF-Systeme maßgeblich Methoden des maschinellen Lernens zum Einsatz kommen. Die Sicherheit kann damit phänomenologisch anhand von zu bewältigenden Fahrsituationen abgeprüft werden, anstatt das AVF-System in einem hochkomplexen Testraum theoretisch zu untersuchen

(vgl. (Kalra und Paddock 2016)). Dies würde unter anderem die Möglichkeit einer aufwandsarmen Selbstzertifizierung oder Herstellererklärung im Falle von Updates am AVF-System ermöglichen. Updates können so wiederkehrend und teilweise virtuell freigegeben werden, ohne den Genehmigungsprozess erneut durchlaufen zu müssen. Technische Lösungen aus dem Bereich der virtuellen Absicherung können hierbei kurzzyklische Anpassungen rechtssicher ermöglichen (vgl. (Howard 2019)). Auch die Unterschiede diverser Betriebsbereiche werden dadurch berücksichtigt.

Realisiert werden könnte dies beispielsweise durch einen sich weiterentwickelnden Katalog virtueller sowie realer Testszenarien, wobei zuvor auf einer national unabhängigen und neutralen Ebene referenzartig ein Abgleich der virtuellen Testmethoden mit Realfahrten erfolgen müsste. Diesbezüglich sind allerdings noch diverse Herausforderungen wie zum Beispiel das Darstellungsformat der Szenarien, Datenqualitätskontrollen und Zugriffsrechte zur Realisierung zu überwinden. Hierfür bedarf es einer engen Zusammenarbeit zwischen Behörden, Herstellern und Zulieferern, Prüforganisationen sowie weiteren AVF-Akteuren. Relevant ist in diesem Kontext insbesondere die fortlaufende Weiterentwicklung der zu prüfenden Szenarien nach Erkenntnissen aus den Anwendungsfällen sowie hinreichend randomisierte Testszenarien, um ein Overfitting der AVF-Systeme zu vermeiden.

Parallel zur inhaltlichen Definition der Prozesse ist es ebenfalls angeraten, die Betriebsbereichsgenehmigung bundesweit – zum Beispiel in Form eines einheitlichen Leitfadens mit Anforderungen und Bewertungskriterien – zu vereinheitlichen. Diese Handlungsempfehlung adressiert dabei allerdings keine Anpassung der AFGBV oder eine Auflösung der föderalen Zuständigkeit in der Betriebsbereichsgenehmigung, sondern vielmehr eine freiwillige Vereinheitlichung der Prozesse, Dokumente und Bewertungskriterien durch die einzelnen Bundesländer. Somit kann eine individuelle Überprüfung der Betriebsbereichseignung nach wie vor lokalspezifisch erfolgen. Erfahrungen der Hersteller und Betreiber in den Betriebsbereichsgenehmigungen können allerdings zwischen Bundesländern übertragen und damit Effizienzsteigerungen erreicht werden. Kostensensitive Prozesse zur Adaption an unterschiedliche Genehmigungsprozesse und daraus folgende Herausforderungen für die Wirtschaftlichkeit werden vermieden. Langfristig gesehen, sind vereinheitlichte Prozesse, Kriterien und Dokumente damit eine grundlegende Voraussetzung, um die Skalierungsfähigkeit der AVF-Systeme zu befähigen. Mit wachsender Erfahrung über die notwendigen Kompetenzen der AVF-Systeme in bestimmten ODDs und einer zunehmend harmonisierten Infrastruktur (vgl. Kapitel 4.5), kann darauf aufbauend eine gegenseitige Anerkennung der föderalen Betriebsbereichsgenehmigung zur Senkung der Genehmigungsaufwände erfolgen, indem schrittweise zum Beispiel bundesweit gültige Betriebsbereichsklassen („abstrakte Betriebsbereiche“ (KBA 2023b)) definiert werden.

Zur Umsetzung wird auch hier zu einem schrittweisen und praxisorientierten Vorgehen auf Basis der Anwendungsfälle geraten. Eine entsprechende Koordination der Bundesländer zur Prozessvereinheitlichung könnte über ein Gremium vergleichbar zum Runden Tisch „Automatisiertes Fahren“ (BMVI 2023) unter Leitung des BMDV oder die Nationale Koordinationsstelle AVF erfolgen. Entsprechende Abstimmungen hierzu finden aktuell unter Federführung des KBA bereits statt. Die häufige Nennung dieser Herausforderung deutet aber darauf hin, dass eine klarere Kommunikation dieser vereinheitlichenden Aktivitäten gegenüber der Industrie angeraten ist, um Unsicherheiten zu beseitigen oder sogar die Partizipation zu ermöglichen. Neue Erkenntnisse aus dem Prozess der Betriebserlaubnis oder der Betriebsbereichsgenehmigung können so zwischen den beteiligten Stakeholdern disseminiert und je nach Bedarf justiert werden. Eine aktive Partizipation und Vernetzung der unterschiedlichen Interessensgruppen wird gewährleistet.

Rechtsgutachten zu Einzelfragestellungen (z. B. die automatisierte Eintragung Over-the-Air eingestellter Fahrzeugmerkmale in die Zulassungsbescheinigung oder die Form der Darstellung des zur Genehmigung beantragten Betriebsbereichs) können dabei helfen, die Unsicherheit innerhalb des regulatorischen Rahmens und der damit zusammenhängenden Prozesse weiter zu senken. Einzelne Kritikpunkte am regulatorischen Rahmen werden in Kapitel 3.2.2 ebenfalls genannt (z. B. die Qualifikation des Wartungspersonals oder die Prüfindervalle). Eine Bewertung dieser muss allerdings in Form einer fundierten Evaluation des rechtlichen Rahmens stattfinden und kann daher im Rahmen dieser Studie nicht empfohlen, sondern nur als Herausforderung genannt werden.

Dass die gewonnenen Erkenntnisse in die Weiterentwicklung der europäischen und internationalen Regulierung (UNECE) einfließen werden, wird von den befragten Akteuren erwartet. Dies ist vor dem Hintergrund der Marktharmonisierung (vgl. Kapitel 4.5) und den damit zusammenhängenden Herausforderungen (vgl. Kapitel 3.2.3) auch angeraten.

4.4 Bewältigung weiterer, ausgewählter Einzelherausforderungen

Die Bewältigung ausgewählter Einzelherausforderungen soll neben den Anwendungsfällen Impulse zur Entstehung des Wertschöpfungsökosystems setzen sowie die Vertrauensbildung in den Innovationsstandort Deutschland fördern. Die Unsicherheit auf Seiten der Akteure wird gesenkt. Die Überwindung der Einzelherausforderungen muss dabei koordiniert und praxisnah (d. h. verknüpft mit den Anwendungsfällen) erfolgen, um erfolgreich zu sein. Auf Basis der zentralen Herausforderungen (vgl. Kapitel 3.4) sowie der als relevant identifizierten Herausforderungsfelder (vgl. Kapitel 3.3) wird daher die Überwindung der Einzelherausforderungen sowohl für Level-3- als auch für Level-4-Systeme in den folgenden Tätigkeitsfeldern vorgeschlagen:

- Ausbau der V2X- und Kommunikationsinfrastruktur:** Die Möglichkeit für Fahrzeuge, mit anderen Fahrzeugen (Vehicle-to-Vehicle, V2V) oder mit der Infrastruktur (Vehicle-to-Infrastructure, V2I) kommunizieren zu können (zusammengefasst unter V2X), kann einen wichtigen Beitrag zur großflächigen und schnellen Verbreitung des AVF leisten. Zwar müssen die in Deutschland kommerziell verfügbaren, behördlich erlaubten automatisierten Fahrfunktionen und in den USA der Testbetrieb von Robotaxis auch ohne V2X-Kommunikation funktionieren. Aber der Datenaustausch zwischen Automobilen zum Beispiel zu Position, Richtung und Geschwindigkeit des Fahrzeugs selbst oder von Gefahrensituationen sowie zwischen Automobil und stationären Systemen zum Beispiel zur Verkehrsleitung an nicht vorab mit Sensoren erfassbaren Stellen kann sowohl die Effizienz, die Fähigkeiten als auch die Sicherheit des Betriebs von AVF-Systemen entscheidend verbessern (CAR 2 CAR Communication Consortium 2023). Deutschland weist in diesem Zusammenhang eine technisch heterogene und gering ausgebaute Infrastruktur, insbesondere im Vergleich mit Vorreiterländern wie China, auf (vgl. Kapitel 2, (Thiemed 2023; Strohm 2021; Cariad 2023)). So existieren bereits auf physischer Ebene im deutschsprachigen Raum Europas mit Cellular V2X (C-V2X) auf Basis von Mobilfunk und Dedicated Short Range Communication (DSRC) auf Basis von IEEE 802.11p aktuell zwei unterschiedliche Übertragungstechnologien (Vector 2023a). Teilweise erfolgt bereits ein Ausbau mit beiden Technologien, wie die Ertüchtigung fahrbarer Absperrtafeln bei der Autobahn GmbH bis Ende 2023 zeigt (Vogel 2023). Die Initiierung eines flächendeckenden Ausbaus von Empfangs- und Sendeeinheiten auf Basis der festgelegten Anwendungsfälle und Infrastrukturdaten, insbesondere im urbanen Raum, wird vor dem Hintergrund der dargelegten Gründe

allerdings als notwendig gesehen. Möglichkeiten zur Durchsetzung ergeben sich beispielsweise durch Vorschriften zur entsprechenden Berücksichtigung der Standards in bereits existierenden Ausschreibungen zum Infrastrukturausbau von Kommunen. Zur Skalierung früher Anwendungsfälle ist außerdem ein entsprechend flächendeckender Mobilfunkausbau notwendig. Dies ist einerseits für die Nutzung von C-V2X notwendig. Andererseits benötigen aktuelle Level-3-Systeme eine existierende Mobilfunkverbindung, um Karten- und Verkehrsdaten empfangen zu können (Mercedes-Benz 2023b). Durch die Möglichkeit, auf entsprechende Informationssysteme im Cloud-Backend zurückzugreifen, können bestimmte technologische Herausforderungen schneller und – bei entsprechender Mobilfunkverbindung – auch flächendeckend gelöst werden (vgl. Kapitel 3.2.1).

- **Entwicklung und großflächige Diffusion von einheitlichen V2X-Standards und Infrastrukturdaten:** Die zwar schrittweise, aber langsam stattfindende Entwicklung und Diffusion von einheitlichen V2X-Standards und Infrastrukturdaten wird als eine weitere Herausforderung im kritisch bewerteten Herausforderungsfeld „Fehlender flächendeckender und standardisierter Infrastrukturausbau“ gesehen (vgl. Kapitel 3.2.2). Neben dem Ausbau der Infrastruktur z. B. im Sinne von Road-Side-Units (RSU) ist es daher angeraten, die Entwicklung einheitlicher V2X-Implementierungen und Infrastrukturdaten voranzutreiben. Insbesondere in Bezug auf die Infrastrukturdaten existieren hierbei teilweise noch keine einheitlichen Datenstrukturen zum Austausch der Informationen. In einem ersten Schritt ist daher eine Standardisierung dieser, z. B. über die existierenden Möglichkeiten der ETSI und ISO, anzustreben. Für bereits existierende Standards kann es zweckdienlich sein, diese in ihrer konkreten Umsetzung über offene Referenzimplementierungen praxisnah anzugleichen. Die offenen Referenzimplementierungen dienen dabei als erweiterter Spezifikations- und Testraum für die dokumentbezogene Festlegung der Kommunikation und könnten beispielsweise von einem offenen Industriekonsortium als Open Source entwickelt und bereitgestellt werden. Insgesamt bedarf der verbleibende Angleich der existierenden Standards einer stärkeren Zusammenarbeit der diversen Akteure, um gemeinsame Richtlinien und Best Practices für die nicht standardisierten Implementierungsdetails von V2X zu entwickeln (vgl. (Poti-necke et al. 2023)). Neben der Standardisierung ist allerdings auch eine großflächige Diffusion einheitlicher V2X-Standards anzustreben. Abschließend sei daher erwähnt, dass auch die Politik über regulatorische und fördernde Maßnahmen die Einhaltung oder Verbreitung von Standards unterstützen kann. Diese Maßnahme wurde aus industriepolitischen Gründen in der Vergangenheit im Bereich von V2X sowie von Infrastrukturdaten allerdings abgelehnt (vgl. z. B. (Briegleb 2019)), kann jedoch der Marktdiffusion eines einheitlichen V2X-Standards zuträglich sein. Bis dahin ist es in Bezug auf den weiteren Infrastrukturausbau angeraten, technische Flexibilität z. B. durch Multi-Mode-Chips und adaptierbare Softwarestacks vorzusehen, um auch auf zukünftige Anpassungen und Neueinführungen von Standards reagieren zu können (vgl. (CAR 2 CAR Communication Consortium 2023), Kapitel 4.5).
- **Adressierung verbleibender Einzelherausforderungen in der Forschung:** Insbesondere im Ownership-Bereich wurden die technischen Einzelherausforderungen als relevantes Herausforderungsfeld bewertet (vgl. Kapitel 3.3). Konkret wurden hierbei die Einzelherausforderungen der Robustheit und Zuverlässigkeit von Hochleistungshardware, der Übertragbarkeit und Kontextualisierungskompetenz von KI sowie der Unzulänglichkeit von Sensorsystemen in herausfordernden ODDs wie Starkregen und Schnee genannt. Aber auch im Bereich „Sharing“ und „Logistics“ ist davon auszugehen, dass durch die Umsetzung der Anwendungsfälle weitere technische Herausforderungen identifiziert werden (z. B. im Umgang mit Ein-

satzfahrzeugen, vgl. Kapitel 3.2.1), die durch dedizierte Forschung und Entwicklung zu lösen sind. Eine adaptive und zwischen den Ministerien abgestimmte Forschungsstrategie, die maßgeblich die Anwendungsnähe und die relevanten, verbleibenden Einzelherausforderungen adressiert, ist daher zur Unterstützung der Anwendungsfälle und ihre Skalierung anzustreben. Aus diesem Grund ist auch eine ad-hoc Vergabe von neu identifizierten Hürden in Form kleiner Forschungs- und Standardisierungsprojekte bei der Nationalen Koordinationsstelle AVF verortet (vgl. Kapitel 4.2)

- **Bundesweites, digitales Verkehrszeichenkataster:** Neben dem Ausbau der V2X-Infrastruktur stellt die Digitalisierung bislang nicht kommunizierender kommunaler Infrastruktur eine relevante Einzelherausforderung im Herausforderungsfeld „Fehlender flächendeckender und standardisierter Infrastrukturausbau“ dar (vgl. Kapitel 3.3). Einzelne Bundesländer und Verwaltungseinheiten führen bereits digitale Verkehrszeichenkataster (vgl. (VM Baden-Württemberg 2022), (Digitale Stadt Hamburg 2023)). Diese liegen allerdings teilweise in unterschiedlichen Programmen, Granularitäten und Formaten vor (vgl. z. B. (Hoffmann 2022), (Kommunalfabrik 2023)). Die Einführung eines bundesweit einheitlichen, digitalen Verkehrszeichenkatasters – z. B. über den Mobility Data Space des Bundes (MDS, (BMDV 2022)) – kann hierbei für die effiziente Entwicklung sicherer, automatisierter Fahrsysteme und deren Betrieb in Deutschland eine relevante Datengrundlage bilden. Des Weiteren kann die dadurch entstehende bundesweite Organisationsbemühung als Organisationsbasis für die Bereitstellung weiterer Infrastrukturinformationen dienen, wie z. B. über Baustellen oder Örtlichkeiten mit besonderen Gefahren (vgl. „Ausbau der V2X- und Kommunikationsinfrastruktur“). Weitere relevante Datengrundlagen, die neben dem Verkehrszeichenkataster erarbeitet werden könnten, sind eine formale Schilderdatenbank für die Bedeutung und visuelle Darstellung aller Schilder in Europa zum Training und Testen entsprechender Algorithmen sowie eine europäische Regulariendatenbank, die die Straßenverkehrsordnungen in allen europäischen Ländern formal kodiert abbildet. Eine europäische Strategie in Bezug auf dieses Vorgehen ist dabei aus Gründen der Skalierbarkeit angeraten, könnte allerdings der Geschwindigkeit zur Behebung dieser Einzelherausforderung entgegenstehen. Ein schrittweises Vorgehen mit einer Deutschlandzentrierten Vorreiterrolle und anschließenden Erweiterung im europäischen Rahmen ist daher anzuraten.
- **Zentrale Datenbank zu szenario- und örtlich-basierten Corner Cases:** Die Datenbank zur zentralen Abbildung von AVF-relevanten Corner Cases dient einerseits dem in Kapitel 4.3 vorgeschlagenen Prozess zur Genehmigung, kann allerdings auch der Erforschung und Entwicklung von AVF-Systemen zugutekommen. Für letzteren Fall müsste die Datenbank in einen öffentlich einsehbaren und einen abgeschlossenen Teil für den Genehmigungsprozess unterteilt werden und rechtliche und industriebezogene Belange bezüglich der Verfügbarkeit der Daten wären zu klären. Die Etablierung und Befüllung einer solchen Datenbank sowie die Klärung der verbleibenden Fragestellungen (vgl. Kapitel 4.3) ist somit Bestandteil dieses Handlungsfelds, um die entsprechenden Vorteile zu heben. Eine verpflichtende Datenoffenlegung der geförderten Anwendungsfälle in einem standardisierten, anonymisierten Format ist zweckdienlich. Mögliche Datenformate sollten sich an internationalen Standards orientieren (z. B. OpenX-Definition der ASAM, (ASAM 2023)). In ähnlicher Weise wurde auf Basis von in Anwendungsfällen gewonnen und zentral gesammelten Daten in China bereits 2018 ein entsprechender Vorschlag für die Definition der „ISO 34501: 2022 Road Vehicles-Test Scenarios for Automated Driving Systems – Vocabulary“ vorgeschlagen und erarbeitet (Bork 2022).

4.5 Entwicklung eines harmonisierten Markts

Um die Skalierung der Anwendungsfälle nach deren erfolgreicher Etablierung mittelfristig vorantreiben zu können, ist die Existenz sowie eine entsprechende Harmonisierung des Markts in Deutschland und der Europäischen Union (EU) notwendig. Dieses Handlungsfeld zielt daher einerseits darauf ab, die Marktentstehung zu fördern, und andererseits eine anwendungsgetriebene Harmonisierung durch Standardisierung und Regulatorik zu ermöglichen.

Zentrale Elemente, um die Marktentstehung zu fördern, sind die skalierungsfähigen Anwendungsfälle (vgl. Kapitel 4.1). Durch die inkrementelle Ausweitung und Verbreitung dieser in andere Regionen mit ähnlicher ODD kann ein Markt schrittweise etabliert werden. Da die Ausweitung bereits zu Projektbeginn definiert wird, entsteht für die beteiligten Wertschöpfungspartner Planungssicherheit. Zusätzliche Sicherheit kann über die Nachfragebündelung mittels Beschaffungsverbänden (insbesondere im ÖPNV-Kontext des Bereichs „Sharing“) sowie über Abnahmegarantien bei erfolgreicher Skalierung der Anwendungsfälle geschaffen werden. Um die Skaleneffekte weiter zu steigern, kann ein Wissenstransfer sowie die Marktharmonisierung von Anwendungsregionen erfolgen (vgl. Kapitel 4.2 und 4.4).

Die anwendungsgetriebene Harmonisierung der Märkte adressiert die EU-weite Regulatorik (vgl. Kapitel 4.3), die Infrastruktur (z. B. V2X, Kommunikations- und Wartungsinfrastruktur, vgl. Kapitel 4.4) sowie die Ausschreibungsanforderungen der einzelnen Stakeholder, um die notwendigen Skaleneffekte zur wirtschaftlichen Skalierbarkeit von AVF-Systemen zu heben. Zentrale Akteure sind hierbei die Gremien und Konsortien der Normung und Standardisierung sowie die Politik (vgl. (Potinecke et al. 2023)). Hierfür müssen die Erfahrungen mit den bislang eingesetzten, teilweise heterogenen Systemen aus den Anwendungsfällen über die Nationale Koordinationsstelle AVF kurzzyklisch in die Normung und Standardisierung sowie die Regulatorik zur Vereinheitlichung zurückgespielt und dort verankert werden. Die Harmonisierung der vorhandenen Infrastruktur muss daran anschließend politisch über die Anpassung von Förderbedingungen sowie über den kommunalen Infrastrukturausbau zuerst deutschland- und anschließend EU-weit vorangetrieben werden. Um die Umsetzung und Skalierbarkeit der Anwendungsfälle während der Marktharmonisierung nicht zu gefährden, sollten die AVF-Systeme (z. B. Fahrzeuge und Infrastruktur) technische Möglichkeiten zur flexiblen Adaption an neue Standards vorhalten. In Summe muss Deutschland als Innovationsstandort damit eine Vorreiterrolle in der EU-weiten Regulatorik sowie in der internationalen Normung und Standardisierung für AVF-Systeme einnehmen, und dadurch die Harmonisierung des Markts voranzutreiben (vgl. (Potinecke et al. 2023)). Konkrete Handlungen, die erste Schritte zur deutschland- und EU-weiten Marktharmonisierung darstellen können, sind in Kapitel 4.4 beschrieben, können aber um weitere Bemühungen, beispielsweise im Bereich der Fahrzeugarchitekturen, der Straßenverkehrsordnungen und Beschilderungen sowie der Wartungs- und Updateprozesse, ergänzt werden. Die Vereinheitlichung der Ausschreibungsanforderungen ist nahezu ausschließlich im Bereich „Sharing“ im Zusammenhang mit dem ÖPNV möglich. Eine Abstimmung der Verkehrsverbände zur Entstehung von Beschaffungsverbänden – ähnlich z. B. zur Beschaffung von Regionalzügen in Niedersachsen (MW Niedersachsen 2021) – kann über den Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) oder die Nationale Koordinationsstelle AVF erfolgen.

4.6 Etablieren eines gesellschaftlichen Dialogs, Formulierung eines klaren Bekenntnisses der Regierung und Befähigung des Innovationsstandorts Deutschland

Die allgemeinen Herausforderungen des Innovationsstandorts Deutschland werden bei den zentralen Herausforderungsfeldern auf Position fünf im Durchschnitt als kritisch bewertet sowie in den zentralen Herausforderungen als ein Treiber für den fehlenden Impuls identifiziert. Aus diesem Grund spielt eine glaubhafte Positionierung des Innovationsstandorts Deutschland für AVF-Systeme zur Flankierung der genannten Handlungsempfehlungen eine zentrale Rolle. Die Glaubhaftigkeit muss dabei einerseits durch ein klar kommuniziertes Bekenntnis der Regierung zum AVF-Standort Deutschland ausgedrückt werden. Die Strategie AVF (Automatisiertes und Vernetztes Fahren) des BMDV formulierte dieses Ziel, die Potenziale des automatisierten und vernetzten Fahrens für die Mobilität der Zukunft zu erschließen (BMDV 2017). Eine entsprechende Erneuerung und aktive Kommunikation gegenüber der Industrie und Gesellschaft im Zuge aktueller Umfeldynamiken oder Veränderungen zentraler Wirtschaftsfaktoren ist jedoch angeraten. Ergänzt werden muss diese Positionierung andererseits von wahrnehmbaren Maßnahmen, die die Haltung der Regierung und Politik zu diesem Thema konkretisieren und untermauern. Hierzu sind insbesondere diejenigen oben genannten Handlungsempfehlungen geeignet, die sich kurz- bis mittelfristig umsetzen lassen und das Engagement der Politik beweisen. Dadurch wird das Vertrauen in den AVF-Innovationsstandort gehoben, sodass Akteure bereit sind, Risiken in gewissem Rahmen einzugehen und Impulse zu setzen. Des Weiteren kann eine entsprechende Positionierung glaubhaft transportiert werden, indem identifizierte Hürden des Innovationsstandorts (z. B. Überbürokratisierung) abgebaut werden. Entsprechende Maßnahmen betreffen dabei nicht ausschließlich die Automobilwirtschaft und übersteigen daher den Rahmen dieser Studie. Stellvertretend kann beispielsweise auf (OECD 2022) verwiesen werden, die eine ausführliche Analyse des Innovationsstandorts Deutschland vornehmen. Die im AVF-Kontext als besonders relevant identifizierten Herausforderungen des Innovationsstandorts sind in Kapitel 3.2 und 3.3 beschrieben.

Flankiert werden müssen diese politischen Aktivitäten zur Umsetzung und Stärkung des Innovationsstandorts allerdings durch einen gesellschaftlichen Dialog, wie ein tragfähiges Bild zukünftiger Mobilität auszusehen hat und welche Rolle das automatisierte und vernetzte Fahren darin spielt. Dies umfasst unter anderem die Themen der Akzeptanz von AVF-Systemen, eines gesellschaftlich anerkannten Sicherheitslevels und Wertekanonns sowie der Organisation und des Zugangs zu Mobilität. Auf allgemeiner Ebene kann dieser gesellschaftliche Dialog durch Bürgerdialogformate und Bürgerbeteiligungsverfahren, runde Tische und Expertengremien, Öffentlichkeitskampagnen und Informationsveranstaltungen sowie parlamentarische Debatten und Anhörungen geführt werden. Vor dem Hintergrund der großen Anzahl Betroffener und der Emotionalität der unterschiedlichen Themenbereiche (z. B. Individualmobilität und Nachhaltigkeit) sind allerdings bürgernahe Formate angeraten. So hat zum Beispiel die „Nationale Plattform Zukunft der Mobilität“ erfolgreich Bürgerdialoge durchgeführt, bei denen Menschen ihre Meinungen und Ideen zur Verkehrswende einbringen konnten. Dies umfasste Online-Mobilitätswerkstätten sowie Vor-Ort-Dialoge mit Bürgern und Entscheidungsträgern (z. B. ZuHörMobil) (NPM 2021). In ähnlicher Weise könnte dies in Form von Stakeholder-Workshops bei bereits vorhandenen oder zukünftig geförderten Anwendungsfallprojekten stattfinden. Bundesweit könnten vor allem Online-Beteiligungsplattformen genutzt werden, auf denen Bürger ihre Meinungen und Ideen zur Verkehrswende einbringen können. Ein Beispiel ist die Plattform „mobilikon“ des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV), des Saarlands als Vertretung der Länder und des Deutschen Städtetags. Auf der Plattform können sich Kommunen, Länder und der Bund mit weiteren relevanten Experten und Stakeholdern vernetzen,

um Vorschläge und Anregungen zur nachhaltigen Mobilität auszutauschen (Mobilikon 2022).

Handlungsfelder zur Bewältigung
der Herausforderungen

Die im Rahmen dieser Studie erarbeiteten Handlungsempfehlungen zeigen insgesamt mögliche Stellhebel für den Innovationsstandort Deutschland auf, die dann vor dem Ergebnis dieses Diskurses z. B. in Bezug auf die zu fördernden Anwendungsfälle zu konkretisieren sind. Zentral dabei ist allerdings, dass dieser Diskurs auf keinen Fall die Innovations- beziehungsweise Umsetzungsgeschwindigkeit der bisherigen Handlungsempfehlungen beeinflussen sollte. Daher wird geraten, parallel zum gesellschaftlichen Diskurs mit der Umsetzung konsensfähiger Anwendungsfälle zu beginnen und den gesellschaftlichen Dialog parallel herbeizuführen. Einerseits ermöglicht dies einen fundierteren gesellschaftlichen Dialog, da entsprechende Mobilitätssystemfunktionen mit ihren Vor- und Nachteilen erlebbar werden. Andererseits können eventuell notwendige Anpassungen, z. B. aus den Lessons Learned der Anwendungsfälle, unmittelbar bezüglich ihrer Umsetzbarkeit überprüft werden.

5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Das automatisierte und vernetzte Fahren nimmt in der Diskussion um die Zukunft der Mobilität eine immer präsentere Rolle ein. Bereits vor einigen Jahren wurden die wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Vorteile, die sich mit einer breiten Einführung autonomer Fahrsysteme realisieren lassen, ausführlich erörtert. Deutschland als Automobilnation und Wirtschaftsmotor Europas kann sich diesem Trend nicht entziehen und muss stattdessen eine Vorreiterrolle, sowohl aus Standort- als auch aus Akteursperspektive, anstreben. So gilt es vielschichtige Herausforderungen zu bewältigen, die verschiedenen Interessensgruppen zusammen zu bringen und eine bundesweite Strategie zur Implementierung und produktiven Skalierung autonomer Fahrsysteme zu verfolgen. Dabei geht es um weit mehr als die Bewältigung technologischer Hürden durch intensive Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten, nämlich die Schaffung eines ganzheitlichen und akteursübergreifenden Wertschöpfungssystems. Leitend war demnach die Frage, wie sich Deutschland systematisch bis zum Ende der Dekade als Innovationsstandort für AVF etablieren kann.

Ausgangspunkt der Überlegungen bildet eine umfassende Bestandsaufnahme der gegenwärtigen Markt-, Technologie- und Wettbewerbstrends. Hierbei zeigt sich, dass die Ausgangslage Deutschlands und deutscher Akteure sowohl hinsichtlich des zugrundeliegenden Betriebsmodells (Ownership vs. Sharing) als auch des betrachteten Wertschöpfungsfeldes variiert. Im vom Privatbesitz dominierten Ownership-Modell nehmen inländische Automobilhersteller und -zulieferer eine führende Rolle ein. Mit serienreifen Fahr- und Parksyste men der SAE-Level 2, 2+ sowie ersten Zertifizierungen der Level 3 und 4 – allerdings noch mit stark eingeschränkter Nutzbarkeit – liegen sie auf Augenhöhe mit den Hauptwettbewerbern aus den USA und China. Anders verhält es sich jedoch beim Angebot nutzungszentrierter Sharing-Betriebsmodelle wie Robotaxis und Roboshuttles. Hier befinden sich Europa im Allgemeinen und Deutschland im Besonderen noch immer ausschließlich im Test- und Erprobungsbetrieb mit geringem Reifegrad, während chinesische und US-amerikanische Akteure mittlerweile in einigen Städten bereits kommerzielle Dienste – häufig schon ohne physisch anwesende Sicherheitsfahrer – anbieten.

Die Innovationsleistung deutscher Akteure in den zentralen Wertschöpfungsfeldern Autonomes Fahrsystem, Mobilitätsplattform, Fahrzeugherstellung, Flottendienstleistungen, sonstige Mehrwertdienste und Infrastruktur differiert ebenso. Eine vergleichsweise starke Positionierung inländischer Automobilhersteller und Zulieferer ergibt sich in wichtigen, zumeist jedoch Hardware-fokussierten Teilbereichen des AVF-Systems. Relative Defizite lassen sich hingegen vor allem bei Software- und Daten-basierten Modulen sowie auf Gesamtsystemebene feststellen. Hier ist der internationale Wettbewerb, allen voran US-amerikanische und chinesische Technologiekonzerne und Newcomer, den deutschen Akteuren um Einiges voraus. Der technologische Rückstand geht mit fehlender Erfahrung im Betrieb von autonomen Dienstleistungen einher, allerdings haben starke innerdeutsche Mobilitätsplattformen eine gute Ausgangsposition. In den übrigen Wertschöpfungsfeldern liegen deutsche Unternehmen insgesamt im Mittelfeld. Während die Eigenkompetenzen bei der Industrialisierung von Systemen und Fahrzeugen am höchsten sind, so ergibt sich insbesondere beim Angebot von Mehrwertdiensten – bis auf wenige Ausnahmen – eine besonders schwache Positionierung.

Auf Basis einer umfassenden Literaturrecherche, verschiedener Expertenbefragungen sowie den Ergebnissen der Status-Quo-Analyse konnten zusammen rund 100 vielschichtige Einzelherausforderungen sowie 18 Herausforderungsfelder identifiziert werden, die einer produktiven Skalierung noch im Wege stehen. Diese wurden im Rahmen einer Metaanalyse auf drei zentrale Herausforderungen heruntergebrochen:

1. Rahmenbedingungen zur Umsetzung von AVF-Systemen sind zwar vorhanden, werden jedoch von den Akteuren noch als zu unsicher eingestuft. Dies hat vor allem seinen Ursprung in fehlender Erfahrung bei der Kommerzialisierung von Level-4-Anwendungsfällen, empfundenen Risiken auf Seiten des Geschäftsmodells sowie technologischen und regulatorischen Hürden. Zudem ist die Ausgangssituation Deutschlands insofern einzigartig, als das inländische Akteure bislang weder auf die orchestrierende Rolle des Staates wie in China noch auf finanzstarke Mutterkonzerne mit hoher Risikokapitaltoleranz zurückgreifen können. Speziell die Frage der Finanzierung und erwarteten Rentabilität setzt die an der AVF-Wertschöpfung beteiligten Akteure vor hohe individuelle Risiken.
2. Befürchtete Trittbrettfahrer-Effekte und eine erwartete First-Mover-Disadvantage verhindern die Entstehung eines übergreifenden Wertschöpfungsnetzwerks und führen zu einer Deadlock-Situation. Angesichts der hohen Unsicherheit sowie der hohen Transfer- und Integrationskosten bei Markterschließung sehen Akteure die Gefahr, dass die erstmalige Überwindung nur mit überproportionalem und nicht wirtschaftlichem Aufwand zu bewältigen ist, während spätere Eintritte zu deutlich reduzierten Risiken möglich wären.
3. In der Konsequenz setzt keiner der deutschen Akteure einen Impuls zur Entstehung eines AVF-Wertschöpfungsnetzwerks und damit zur Bewältigung der systemischen Herausforderungen. Dabei haben eine bislang fehlende Förderung von AVF-Systemen nahe Marktreife und ein sinkendes Vertrauen in den Innovationsstandort Deutschland zusätzlich negative Effekte.

Wenn Deutschland bis Ende der Dekade zum AVF-Innovationsstandort avancieren möchte, dann muss die konsequente Beseitigung dieser Hemmschwellen zu einer der Kernaufgaben der aktuellen und künftigen Bundesregierung erklärt werden. Für ein solches „Moonshot-Projekt“ kann die Abarbeitung folgender fünf Handlungsfelder einen wesentlichen Beitrag leisten:

1. **Förderung skalierungsfähiger Anwendungsfälle nahe Marktreife:** Für eine zügige Kommerzialisierung von AVF-Systemen ist mit Hinblick auf Wirtschaftlichkeit, Kundennutzen und Neuheitsgrad eine Priorisierung besonders vielversprechender Anwendungsfälle erforderlich. Diese sollten, begleitend durch hochrangige Projektkonsortien relevanter Akteure sowie etwaige finanzielle Anreize, vorangetrieben werden, um das Kooperationsrisiko zu senken und einen Impuls zu setzen.
2. **Aufbau einer nationalen Koordinationsstelle AVF:** Die konsequente Bewältigung der granularen Einzelherausforderungen sowie der systemischen Hemmnisse erfordert eine koordinierende und katalysierende Entität, die die für eine produktive Skalierung relevanten Akteure an einen Tisch holt. Zu den Kernaufgaben zählen die Unterstützung bei der Beseitigung praktischer Hürden, der Wissenstransfer zwischen Anwendungsfällen und beteiligten Akteuren sowie die Bereitstellung einer Koordinations- und Abstimmungsplattform mit ausreichender Entscheidungsgewalt.
3. **Definition bundesweit einheitlicher und unbürokratischer Genehmigungsprozesse:** Die Prozesse der Betriebserlaubnis und Betriebsbereichsgenehmigung sind zwar bereits regulatorisch definiert, wurden jedoch bislang faktisch nicht erprobt oder von einem Hersteller durchlaufen. Zur Reduzierung bürokratischer Hürden empfiehlt sich ein praxisbezogener Ansatz, bei dem die relevanten Prozesse, Kriterien und Nachweise nach den Genehmigungsbedarfen der Anwendungsfälle schrittweise und Szenario-basiert definiert und anschließend in Form eines bundesweit vereinheitlichten Anforderungskatalogs kommuniziert werden.
4. **Bewältigung weiterer, relevanter Einzelherausforderungen:** Neben den zentralen Herausforderungen haben auch die zahlreichen Einzelhemmnisse eine nicht zu unterschätzende Wirkung auf fehlende Impulse. So empfehlen sich Maßnahmen wie der Ausbau der V2X- und Kommunikationsinfrastruktur, die Entwicklung und

großflächige Diffusion von einheitlichen V2X-Standards sowie Infrastrukturdaten, die Durchführung verschiedenartiger Forschungsvorhaben zur Adressierung verbleibender technologischer und ethischer Problemstellungen sowie der Aufbau eines bundesweiten Verkehrszeichenkatasters und einer Datenbank zum Wissenstransfer von szenario- und örtlich-basierten Corner Cases.

5. **Entwicklung eines harmonisierten Markts:** Die wirtschaftliche und geographische Attraktivität des deutschen Markts für Akteure von AVF-Systemen kann nur durch eine über die Bundesrepublik hinausgehende Harmonisierung im Rahmen der Europäischen Union (EU) erreicht werden. Maßnahmen wie eine einheitliche Definition der erforderlichen Betriebsbedingungen, die gemeinschaftliche Förderung skalierungsfähiger Anwendungsfälle oder die Nachfragebündelung mittels länderübergreifender Beschaffungsverbände könnten – begleitet durch einen ständigen Wissenstransfer und Austausch sowie Aktivitäten in der Normung und Standardisierung – die notwendigen Skaleneffekte erzeugen.

Wenn das Anliegen des Innovationsstandorts Deutschlands, eine führende Rolle bei der Entwicklung und Kommerzialisierung des automatisierten und vernetzten Fahrens einzunehmen, als glaubwürdig wahrgenommen werden soll, dann sind angesichts der herausfordernden Ausgangslage zusätzliche, übergeordnete Anstrengungen notwendig. So bedarf es eines eindeutigen, aktualisierten und konkretisierten Bekenntnisses der Regierung zur AVF-Vision und -Strategie, das aktiv in die Industrie und Gesellschaft getragen wird. Ebenso ist besonders die Umsetzung kurz- bis mittelfristiger Maßnahmen zu empfehlen, um das verkündete Engagement auch durch Taten zu unterstreichen. Damit steigt sowohl das Vertrauen der Verbraucher als auch der Akteure in den Innovationsstandort Deutschland und setzt wichtige Impulse für das weitere Vorgehen. Begleitet werden müssen die politischen Aktivitäten durch einen gesellschaftlichen und möglichst bürgernahen Dialog, der sich mit Themen wie der Akzeptanz von AVF-Systemen, der Entwicklung eines gesellschaftlich anerkannten Sicherheitslevels und Wertekanons sowie der Organisation und des Zugangs zu Mobilität auseinandersetzt.

Deutschland zu einem führenden Innovationsstandort für AVF zu machen, ist nicht einfach, aber angesichts vorhandener Kompetenzen und Rahmenbedingungen möglich. Das ist das zentrale Ergebnis der Studie. Allerdings ist das Zeitfenster vor dem Hintergrund der globalen Wettbewerbssituation hierfür klein. Um das Ziel zu erreichen, ist jedoch – unabhängig von der Umsetzung der beschriebenen Einzelmaßnahmen – ein eindeutiger politischer Wille sowie eine hohe Koordinationskraft und Kooperationsbereitschaft der relevanten Akteure eine notwendige Voraussetzung. Und es gibt keine Alternative, da AVF eines der wichtigsten Innovations- und Wertschöpfungsfelder der Mobilität der Zukunft darstellt. Um wettbewerbsfähig zu bleiben, müssen am Standort Deutschland (wie auch in den letzten Dekaden) überdurchschnittliche Innovationskraft und Veränderungsmut bewiesen sowie aktuell existierende Nachteile bei zentralen Standortfaktoren mit größtmöglichem Nachdruck eliminiert werden.

6 Anhang

Anhang

Anhang 1: Serienverfügbarkeit von Level 2+ und Level 3 Fahrsystemen ausgewählter OEMs

| OEM | AD-Level | Betriebsbereich/ Operational Design Domain (ODD) | | | | Markteinführung | | | | Modelle |
|-------|----------|---|----------|-------|----------|---|---|---|---|-----------------------|
| | | Stau auf Autobahn | Autobahn | Stadt | Überland |  |  |  |  | |
| MB | 3 | Stau auf Autobahn | Autobahn | Stadt | Überland | 2023 | - | 2022 | - | S-Klasse, EQS |
| BMW | 3** | Stau auf Autobahn | Autobahn | Stadt | Überland | - | - | 2023 | - | 7er |
| | 2+ | Stau auf Autobahn | Autobahn | Stadt | Überland | 2022 | - | 2023 | - | 7er, 5er |
| Honda | (3)* | Stau auf Autobahn | Autobahn | Stadt | Überland | - | - | - | 2021 | Legend |
| TESLA | 2+ | Stau auf Autobahn | Autobahn | Stadt | Überland | 2022 | - | - | - | Model S, X, 3, Y |
| GM | 2+ | Stau auf Autobahn | Autobahn | Stadt | Überland | 2022 | - | - | - | z.B. Lyriq, Silverado |
| | 2+** | Stau auf Autobahn | Autobahn | Stadt | Überland | 2023 | - | - | - | Celestiq |
| Ford | 2+ | Stau auf Autobahn | Autobahn | Stadt | Überland | 2022 | - | - | - | z.B. Mach-E, F-150 |
| XPENG | (2+)* | Stau auf Autobahn | Autobahn | Stadt | Überland | - | 2022 | - | - | P5, P7i, G9 |
| BAIC | (2+)* | Stau auf Autobahn | Autobahn | Stadt | Überland | - | 2022 | - | - | Alpha-S HI |

Quelle: CAM | * Stark eingeschränkte Verfügbarkeit, ** Bis Ende 2023 angekündigt

Quelle: Eigene Darstellung

Anhang 2: Bewertung von AVF-Anwendungsfällen aus deutscher Sicht

| Anwendungsfall | Betriebsbedingungen/ ODD | Value Proposition | Umsetzungs-komplexität | Neuheitsgrad |
|--|---|-------------------|------------------------|--------------|
| Staupilot (bis 60 km/h) | Einsetzbar in Situationen mit besonders dichtem Verkehr oder Stau auf den meisten Autobahnabschnitten eines Landes (z.B. Deutschland) bis zu einer maximalen Geschwindigkeit von 60 km/h, Fahrer muss innerhalb von 10 Sekunden das Steuer übernehmen können, kein Extremwetter, keine Tunnel | Gering | Gering | Gering |
| Autobahn-pilot Level 3 (bis 130 km/h) | Einsetzbar auf den meisten Autobahnabschnitten eines Landes (z.B. Deutschland) im Geschwindigkeitsbereich 0 bis 130 km/h, Fahrer muss innerhalb von 10 Sekunden das Steuer übernehmen können, keine Extremwetterlagen | Mittel bis hoch | Mittel | Mittel |
| Landstraßen-pilot Level 3 (bis 100 km/h) | Breite Verfügbarkeit auf Überlandstraßen eines Landes (z.B. Deutschland) im Geschwindigkeitsbereich bis 100 km/h, inklusive Durchfahrtsstraßen, Fahrer muss innerhalb von 10 Sekunden das Steuer übernehmen können, keine Extremwetterlagen | Mittel bis hoch | Hoch | Hoch |
| City-Pilot Level 3 (bis 50 km/h) | Breite Verfügbarkeit in Stadtgebieten eines Landes (z.B. Deutschland) im Geschwindigkeitsbereich bis 50 km/h, inklusive Kreuzungen und Kreisverkehren, Fahrer muss innerhalb von 10 Sekunden das Steuer übernehmen können, keine Extremwetterlagen | Mittel bis hoch | Hoch | Hoch |

| Anwendungsfall | Betriebsbedingungen/ ODD | Value Proposition | Umsetzungs-komplexität | Neuheitsgrad |
|---|--|-------------------|------------------------|--------------------|
| Parkpilot Level 4 „Entry“ | Automatisches Parken in ausgewählten Parkhäusern eines Betreibers eines Landes (z.B. Deutschland), Geschwindigkeitsbereich bis 10 km/h, speziell frei gehaltene Parkplätze, Mischverkehr, spezielle Drop-Off- und Pick-Up-Zonen | Gering bis mittel | Gering bis mittel | Mittel |
| Parkpilot Level 4 „Advanced“ | Automatisches Parken in vielen Parkhäusern unterschiedlicher Betreiber eines Landes (z.B. Deutschland), Geschwindigkeitsbereich bis 10 km/h, speziell frei gehaltene Parkebene, Mischverkehr, spezielle Drop-Off- und Pick-Up-Zonen | Mittel bis hoch | Mittel | Hoch |
| Parkpilot Level 4 „Maximum“ | Automatisches Parken auf nahezu allen öffentlich zugänglichen Parkplätzen und Parkhäusern (unterschiedliche Betreiber) eines Landes (z.B. Deutschland), Geschwindigkeitsbereich bis 10 km/h, Mischverkehr, spezielle Drop-Off- und Pick-Up-Zonen | Mittel bis hoch | Hoch | Hoch bis sehr hoch |
| Autobahnpilot Level 4 (bis 130 km/h) | Einsetzbar auf den meisten Autobahnabschnitten eines Landes (z.B. Deutschland) im Geschwindigkeitsbereich 0 bis 130 km/h, keine Extremwetterlagen | Hoch | Hoch | Hoch bis sehr hoch |
| Landstraßenpilot Level 4 (bis 100 km/h) | Breite Verfügbarkeit auf Überlandstraßen eines Landes (z.B. Deutschland) im Geschwindigkeitsbereich bis 100 km/h, inklusive Durchfahrtsstraßen, keine Extremwetterlagen | Hoch | Hoch bis sehr hoch | Sehr hoch |
| City-Pilot Level 4 (bis 50 km/h) | Breite Verfügbarkeit in Stadtgebieten eines Landes (z.B. Deutschland) im Geschwindigkeitsbereich bis 50 km/h, inklusive Kreuzungen und Kreisverkehren, keine Extremwetterlagen | Hoch | Hoch bis sehr hoch | Hoch bis sehr hoch |
| Robotaxi Level 4 „Entry“ | Einzelne kommerziell buchbare autonome On-Demand Taxis (Ride-Hailing, mit Sicherheitsfahrer) in speziell ausgewiesenen kleinen städtischen Betriebsgebieten zu Randzeiten, flexible Routenführung innerhalb des Gebiets, Geschwindigkeit bis 50 km/h, Remote-Überwachung | Gering bis mittel | Hoch | Gering |
| Robotaxi Level 4 „Advanced“ | Viele kommerziell buchbare autonome On-Demand Taxis (Ride-Hailing, ohne Sicherheitsfahrer) in speziell ausgewiesenen breiten städtischen Betriebsgebieten, flexible Routenführung innerhalb des Gebiets, Geschwindigkeit bis 50 km/h, Remote-Überwachung | Mittel bis hoch | Hoch bis sehr hoch | Gering |
| Robotaxi Level 4 „Maximum“ | Viele kommerziell buchbare autonome On-Demand Taxis (Ride-Hailing, ohne Sicherheitsfahrer) in breiten Betriebsgebieten (Metropolen + Speckgürtel), flexible Routenführung innerhalb des Gebiets, Geschwindigkeit bis 80 km/h, Remote-Überwachung | Hoch | Hoch bis sehr hoch | Mittel bis hoch |
| Robobus Level 4 „Entry“ | Einzelne kommerziell nutzbare autonome Linienbusse mit fester Routenführung (mit Sicherheitsfahrer) in speziell ausgewiesenen kleinen städtischen Gebieten zu Randzeiten, getrennte Fahrspuren, weitestgehend ohne Mischverkehr (spezielle V2X-Führung an Kreuzungen), Geschwindigkeit bis 50 km/h, Remote-Überwachung | Gering | Mittel | Hoch |

Anhang

| Anwendungsfall | Betriebsbedingungen/ ODD | Value Proposition | Umsetzungs-komplexität | Neuheitsgrad | Anhang |
|----------------------------------|---|-------------------|------------------------|--------------------|--------|
| Robobus Level 4 „Advanced“ | Viele kommerziell nutzbare autonome Linienbusse mit fester Routenführung (ohne Sicherheitsfahrer) in speziell ausgewiesenen breiten städtischen Gebieten ohne zeitliche Einschränkung, getrennte Fahrspuren, weitestgehend ohne Mischverkehr (spezielle V2X-Führung an Kreuzungen), Geschwindigkeit bis 50 km/h, Remote-Überwachung | Hoch | Mittel | Hoch bis sehr hoch | |
| Robobus Level 4 „Maximum“ | Viele kommerziell nutzbare autonome Linienbusse mit fester Routenführung (ohne Sicherheitsfahrer) in speziell ausgewiesenen breiten städtischen und ländlichen Gebieten, nur teilweise getrennte Fahrspuren, überwiegend Mischverkehr, Geschwindigkeit bis 80 km/h, Remote-Überwachung | Hoch | Hoch | Sehr hoch | |
| Roboshuttle Level 4 „Entry“ | Einzelne kommerziell buchbare autonome On-Demand Shuttles (Ride-Pooling, mit Sicherheitsfahrer) in speziell ausgewiesenen kleinen städtischen Betriebsgebieten zu Randzeiten, flexible Routenführung innerhalb des Gebiets, Geschwindigkeit bis 50 km/h, Remote-Überwachung | Gering bis mittel | Mittel | Mittel bis hoch | |
| Roboshuttle Level 4 „Advanced“ | Viele kommerziell buchbare autonome On-Demand Shuttles (Ride-Pooling, ohne Sicherheitsfahrer) in speziell ausgewiesenen breiten städtischen Betriebsgebieten, flexible Routenführung innerhalb des Gebiets, Geschwindigkeit bis 50 km/h, Remote-Überwachung | Mittel bis hoch | Hoch | Hoch | |
| Roboshuttle Level 4 „Zubringer“ | Viele kommerziell buchbare autonome On-Demand Shuttles (Ride-Pooling, ohne Sicherheitsfahrer) in speziell ausgewiesenen ländlichen Gebieten mit der Funktion eines Zubringers zu Anschlussmobilität (z.B. Bahnhof), nach Möglichkeit getrennte Fahrspuren, weitestgehend ohne Mischverkehr (spezielle V2X-Führung an Kreuzungen), Geschwindigkeit bis 80 km/h, Remote-Überwachung | Mittel bis hoch | Hoch | Hoch bis sehr hoch | |
| Roboshuttle Level 4 „Maximum“ | Viele kommerziell buchbare autonome On-Demand Shuttles (Ride-Pooling, ohne Sicherheitsfahrer) in breiten Betriebsgebieten (Metropolen + Speckgürtel), flexible Routenführung innerhalb des Gebiets, Geschwindigkeit bis 80 km/h, Remote-Überwachung | Hoch | Hoch bis sehr hoch | Sehr hoch | |
| Platooning „Entry“ (Logistik) | Lead-Fahrzeug (inkl. Fahrer an Bord) fährt in Konvoi mit max. zwei weiteren Trailing-Fahrzeugen (ohne Fahrer) auf einigen Autobahnabschnitten zwischen zwei in der Nähe von Auf-/Abfahrten befindlichen Verteilzentren ("Hubs"), V2V-Kommunikation zwischen Lead- und Trailing-Fahrzeugen, unterschiedliche Lkw-Hersteller, vorrangig über Nacht | Mittel | Mittel | Mittel | |
| Platooning „Advanced“ (Logistik) | Lead-Fahrzeug (inkl. Fahrer an Bord) fährt in Konvoi mit max. zwei weiteren Trailing-Fahrzeugen (ohne Fahrer) auf vielen Autobahnabschnitten zwischen zwei in der Nähe von Auf-/Abfahrten befindlichen Verteilzentren ("Hubs"), V2V-Kommunikation zwischen Lead- und Trailing-Fahrzeugen, unterschiedliche Lkw-Hersteller, keine zeitlichen Einschränkungen | Mittel bis hoch | Mittel | Mittel | |

| Anwendungsfall | Betriebsbedingungen/ ODD | Value Proposition | Umsetzungskomplexität | Neuheitsgrad | Anhang |
|-------------------------------------|--|--------------------|-----------------------|--------------|--------|
| Hub-to-Hub Pilot Level 4 (Logistik) | Autonomer Autopilot ohne Sicherheitsfahrer, einsetzbar auf den meisten Autobahnabschnitten eines Landes (z.B. Deutschland) im Geschwindigkeitsbereich 0 bis 80 km/h, Routenführung zwischen zwei in der Nähe von Auf-/Abfahrten befindlichen Verteilzentren ("Hubs"), Remote-Überwachung | Hoch bis sehr hoch | Mittel bis hoch | Hoch | |

Quelle: Eigene Darstellung

Anhang 3: Bewertung der Anwendungsfälle in Bezug auf die Herausforderungsfelder

Anhang

| Anwendungsfall | Technische Einzelherausforderungen | Standardisierung der VZ-Infrastruktur | Unsicherheit bzgl. der Umsetzung reg. Rahmenbedingungen | Förderale Zuständigkeit | Methodische Absicherung | Fehlende Markt-harmonisierung | Fachkräfte-verfügbarkeit | Sinkende Attraktivität als Innovationsstandort | Fehlender Markt für Level-4-Systeme | Ökonom. Tragfähigkeit der Herstellung | Ökonom. Tragfähigkeit des Betriebs von AVF-Systemen | Fehlender flächendeck. Infrastrukturausbau | Fehlende Akzeptanz der Nutzenden | Fehlende Metriken u. Konsens bzgl. Sicherheit | Widerstand der Anbieten den | Agilität und Qualität von Forschungsprojekten |
|--|------------------------------------|---------------------------------------|---|-------------------------|-------------------------|-------------------------------|--------------------------|--|-------------------------------------|---------------------------------------|---|--|----------------------------------|---|-----------------------------|---|
| Staupilot (bis 60 km/h) | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| Autobahnpiilot Level 3 (bis 130 km/h) | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| Landstraßenpiilot Level 3 (bis 100 km/h) | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| City-Pilot Level 3 (bis 50 km/h) | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| Parkpiilot Level 4 „Entry“ | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| Parkpiilot Level 4 „Advanced“ | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| Parkpiilot Level 4 „Maximum“ | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| Autobahnpiilot Level 4 (bis 130 km/h) | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| Landstraßenpiilot Level 4 (bis 100 km/h) | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| City-Pilot Level 4 (bis 50 km/h) | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| Robotaxi Level 4 „Entry“ | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| Robotaxi Level 4 „Advanced“ | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| Robotaxi Level 4 „Maximum“ | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| Robobus Level 4 „Entry“ | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| Robobus Level 4 „Advanced“ | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| Robobus Level 4 „Maximum“ | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| Roboshuttle Level 4 „Entry“ | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| Roboshuttle Level 4 „Advanced“ | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| Roboshuttle Level 4 „Zubringer“ | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| Roboshuttle Level 4 „Maximum“ | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| Platooning „Entry“ (Logistik) | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| Platooning „Advanced“ (Logistik) | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| Hub-to-Hub Pilot Level 4 (Logistik) | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |

Quelle: Eigene Darstellung

7 Literaturverzeichnis

Anhang

Abele, Corinne (2023): China gewinnt Marktanteile im Kfz-Sektor durch Elektroautos. Markttrends. Hg. v. Germany Trade & Invest. Online verfügbar unter <https://www.gtai.de/de/trade/china/branchen/china-gewinnt-marktanteile-im-kfz-sektor-durch-elektroautos-595692>, zuletzt geprüft am 13.9.23.

Ad-Hoc-Gruppe „Smart Car“; Expertenkreises „Transformation der Automobilwirtschaft“; Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO; Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz; Bundesministerium für Digitales und Verkehr (2023): Expertenumfrage im Rahmen des Workshops zum automatisierten und vernetzten Fahren. Berlin.

apollo.auto (2023): Baidu Apollo Sicherheitsreport. Online verfügbar unter <https://www.apollo.auto/news/autonomous-driving/9490>, zuletzt aktualisiert am 19.10.2023, zuletzt geprüft am 19.10.2023.

ASAM (2023): Standardization. Online verfügbar unter <https://www.asam.net/standards/>, zuletzt aktualisiert am 18.10.2023, zuletzt geprüft am 18.10.2023.

ATLAS-L4 (2022): Autonome Trucks: Forschungsprojekt ATLaS. Online verfügbar unter <https://www.atlas-l4.com/>, zuletzt aktualisiert am 17.10.2023, zuletzt geprüft am 19.10.2023.

Aurora (2023): Aurora Investor Presentation - May 2023.

UN Regulation No. 157: Automated Lane Keeping Systems. Online verfügbar unter <https://unece.org/transport/documents/2021/03/standards/un-regulation-no-157-automated-lane-keeping-systems-alks>, zuletzt geprüft am 12.10.2023.

Baidu (2023): Baidu Announces Second Quarter 2023 Results. Online verfügbar unter <https://ir.baidu.com/news-releases/news-release-details/baidu-announces-second-quarter-2023-results>, zuletzt aktualisiert am 19.10.2023, zuletzt geprüft am 19.10.2023.

bdo (2023): Gravierender Mangel an Lkw- und Busfahrer:innen. Online verfügbar unter <https://bdo.org/presse/pressemeldungen/gravierender-mangel-an-lkw-und-busfahrerinnen>, zuletzt aktualisiert am 20.10.2023, zuletzt geprüft am 20.10.2023.

Bellan, Rebecca (2023a): TuSimple has started testing its self-driving truck tech in Japan. In: *TechCrunch*, 07.06.2023. Online verfügbar unter <https://techcrunch.com/2023/06/06/tusimple-has-started-testing-its-self-driving-truck-tech-in-japan/?guccounter=1>, zuletzt geprüft am 19.10.2023.

Bellan, Rebecca (2023b): GM halts production of Cruise Origin robotaxi amid suspended operations. In: *TechCrunch*, 07.11.2023. Online verfügbar unter <https://techcrunch.com/2023/11/06/gm-halts-production-of-cruise-origin-robotaxi-amid-suspended-operations/>, zuletzt geprüft am 17.11.2023.

berylls (2022a): Autonomous Trucking: How disruptive technology will redistribute value pools. Online verfügbar unter <https://www.berylls.com/autonomous-trucking-how-disruptive-technology-will-redistribute-value-pools/>, zuletzt aktualisiert am 26.03.2023, zuletzt geprüft am 19.10.2023.

berylls (2022b): A Backseat for Drivers. Autonomous Driving will Be the Backbone of Shared Mobility in Europe. Online verfügbar unter https://www.berylls.com/wp-content/uploads/2022/10/BSA-Studie-Mobility-Market-Model-10-2022_final.pdf, zuletzt geprüft am 12.10.2023.

BICMI (2022): Beijing Innovation Center for Mobility Intelligent Annual Report 2022.

BimmerToday.de (2023): BMW-Vorstand Weber: Autonomes Fahren Level 3 noch 2023. Online verfügbar unter <https://www.bimmertoday.de/2023/01/08/bmw-vorstand-weber-autonomes-fahren-level-3-noch-2023/>, zuletzt aktualisiert am 07.01.2023, zuletzt geprüft am 19.10.2023.

Bitkom (2022): Autonomes Fahren: Klimaschutz gilt als größter Vorteil. In: *Bitkom e.V.*, 17.11.2022. Online verfügbar unter https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Autonomes-Fahren-Klimaschutz-groesster-Vorteil#_, zuletzt geprüft am 19.10.2023.

Bitkom (2023a): Die Zukunft fährt selbst. Online verfügbar unter <https://www.bitkom.org/Bitkom/Publikationen/Whitepaper-Die-Zukunft-faehrt-selbst>, zuletzt aktualisiert am 19.07.2023, zuletzt geprüft am 19.10.2023.

Bitkom (2023b): Jeden Tag 10 neue Mobilfunkstandorte. Netzbetreiber machen Tempo beim Ausbau. In: *Bitkom e.V.*, 10.03.2023. Online verfügbar unter <https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Neue-Mobilfunkstandorte-Netzbetreiber-machen-Tempo-Ausbau>, zuletzt geprüft am 14.10.2023.

Bitkom e.V. (2022): Autonome-Fahrzeuge-Genehmigungs-und-Betriebs-Verordnung (AFGBV) des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV). Stellungnahme. Online verfügbar unter https://www.bitkom.org/sites/main/files/2022-02/Bitkom_Stellungnahme_AFGBV_2022-02-24.pdf, zuletzt geprüft am 12.10.2023.

Block, Lukas (2023): Ein Verfahren zur Entwicklung flexibler Fahrzeug-Software- und -Hardware-Architekturen unter Unsicherheit (in print): Springer.

BMDV (2017): Bericht zum Stand der Umsetzung der Strategie automatisiertes und vernetztes Fahren. Online verfügbar unter <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/bericht-avf.html>, zuletzt aktualisiert am 18.10.2023, zuletzt geprüft am 18.10.2023.

BMDV (2022): Der Mobility Data Space. Online verfügbar unter <https://bmdv.bund.de/DE/Themen/Digitales/Mobility-Data-Space/mds.html>, zuletzt aktualisiert am 18.10.2023, zuletzt geprüft am 18.10.2023.

BMVI (2023): Runder Tisch "Automatisiertes Fahren". Online verfügbar unter <https://fragdenstaat.de/anfrage/runder-tisch-automatisiertes-fahren/>, zuletzt aktualisiert am 12.10.2023, zuletzt geprüft am 12.10.2023.

BMW (2023): BMW und Valeo beschließen eine strategische Partnerschaft zur gemeinsamen Entwicklung automatisierter Level-4-Parklösungen der nächsten Generation. Online verfügbar unter <https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0408778DE/bmw-und-valeo-beschliessen-eine-strategische-partnerschaft-zur-gemeinsamen-entwicklung-automatisierter-level-4-parkloesungen-der-naechsten-generation>, zuletzt aktualisiert am 19.10.2023, zuletzt geprüft am 19.10.2023.

Bork, Henrik (2022): ISO-Norm für autonomes Fahren trägt Chinas Handschrift. Hg. v. Vogel Communications Group GmbH & Co. KG. Next Mobility. Online verfügbar unter <https://www.next-mobility.de/iso-norm-fuer-autonomes-fahren-traegt-chinas-handschrift-a-7016af7b78fbb92d5004df7f851b2a6d/>, zuletzt geprüft am 12.10.23.

Bosch (2023): Bosch und APCOA bringen deutschlandweit Technik für Automated Valet Parking in Parkhäuser. Online verfügbar unter <https://www.bosch-presse.de/pressportal/de/de/bosch-und-apcoa-bringen-deutschlandweit-technik-fuer-automated-valet-parking-in-parkhaeuser-250496.html>, zuletzt aktualisiert am 29.08.2023, zuletzt geprüft am 19.10.2023.

Boulding, William; Christen, Markus (2001): First-Mover Disadvantage. Online verfügbar unter <https://hbr.org/2001/10/first-mover-disadvantage>, zuletzt aktualisiert am 01.08.2014, zuletzt geprüft am 16.10.2023.

Bratzel, Stefan (2022): Akzeptanz autonomer Fahrzeuge in Deutschland. Center of Automotive Management (CAM). Online verfügbar unter <https://autoinstitut.de/automotiveinnovations/mobility-services/akzeptanz-autonomer-fahrzeuge-in-deutschland/>, zuletzt aktualisiert am 01.08.2022, zuletzt geprüft am 12.10.2023.

Bratzel, Stefan; Böbber, Felix (2023): Digitalisierung in der Mobilitätswirtschaft. Erfolgsfaktoren der Daten- und Plattformökonomie. e-mobil BW GmbH. Online verfügbar unter https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/e-mobilBW_Studie_Digitalisierung_in_der_Mobilitaetswirtschaft_Daten-_und_Plattformoekonomie.pdf, zuletzt geprüft am 12.10.2023.

Bratzel, Stefan; Tellermann, Ralf (2023): AutomotiveINNOVATIONS 2023 Report. Die Innovationsstärke der globalen Automobilhersteller und Automobilzulieferer.

Bratzel, Stefan; Tellermann, Ralf; Böbber, Felix (2023): Mobility Services Report 2023.

Briegleb, Volker (2019): V2X: Telekom und BMW gegen EU-Vorschrift für vernetztes Fahren. In: *heise online*, 15.04.2019. Online verfügbar unter <https://www.heise.de/news/V2X-Telekom-und-BMW-gegen-EU-Vorschrift-fuer-vernetztes-Fahren-4400118.html>, zuletzt geprüft am 18.10.2023.

bts.gov (2023): Moving Goods in the United States. Online verfügbar unter <https://data.bts.gov/stories/s/Moving-Goods-in-the-United-States/bcyt-rqmu/>, zuletzt aktualisiert am 19.10.2023, zuletzt geprüft am 19.10.2023.

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz der Bundesrepublik Deutschland; ifok GmbH (2023): Call for Evidence. Zukunft des automatisierten und vernetzten Fahrens. Online verfügbar unter https://expertenkreis-automobilwirtschaft.de/media/pages/home/a74aa779a3-1679397034/call-for-evidence-avf_auswertung.pdf, zuletzt geprüft am 16.10.2023.

Bundesnetzagentur (2023): Breitbandatlas. Online verfügbar unter <https://www.gigabitgrundbuch.bund.de/GIGA/DE/Breitbandatlas/start.html>, zuletzt aktualisiert am 12.10.2023, zuletzt geprüft am 12.10.2023.

businesswire.com (2021): Gatik and Walmart Achieve Fully Driverless Deliveries in a First for Autonomous Trucking Industry Worldwide. Online verfügbar unter <https://www.businesswire.com/news/home/20211108005409/en/Gatik-and-Walmart-Achieve-Fully-Driverless-Deliveries-in-a-First-for-Autonomous-Trucking-Industry-Worldwide>, zuletzt aktualisiert am 19.10.2023, zuletzt geprüft am 19.10.2023.

businesswire.com (2023): Gatik Announces Collaboration with America's Grocer to Future-Proof Supply Chain with Autonomous Box Trucks. Online verfügbar unter <https://www.businesswire.com/news/home/20230315005374/en/Gatik-Announces-Collaboration-with-America%E2%80%99s-Grocer-to-Future-Proof-Supply-Chain-with-Autonomous-Box-Trucks>, zuletzt aktualisiert am 19.10.2023, zuletzt geprüft am 19.10.2023.

California DMV (2023): Disengagement Reports - California DMV. Online verfügbar unter <https://www.dmv.ca.gov/portal/vehicle-industry-services/autonomous-vehicles/disengagement-reports/>, zuletzt aktualisiert am 25.08.2023, zuletzt geprüft am 19.10.2023.

Canalys (2021): Huge opportunity as only 10% of the 1 billion cars in use have ADAS features. Online verfügbar unter <https://www.canalys.com/newsroom/huge-opportunity-as-only-10-of-the-1-billion-cars-in-use-have-adas-features>, zuletzt aktualisiert am 11.01.2022, zuletzt geprüft am 19.10.2023.

CAR 2 CAR Communication Consortium (2023): Car 2 Car FAQs. Online verfügbar unter <https://www.car-2-car.org/about-c-its/c-its-faqs>, zuletzt aktualisiert am 12.10.2023, zuletzt geprüft am 12.10.2023.

Cariad (2023): Developing ADAS/AD Technology in China. Online verfügbar unter <https://cariad.technology/de/en/news/stories/automated-driving-technology-china.html>, zuletzt aktualisiert am 20.10.2023, zuletzt geprüft am 20.10.2023.

chinadaily.com.cn (2022): Autonomous trucks gaining ground. Online verfügbar unter <https://www.chinadaily.com.cn/a/202208/19/WS62fee7a8a310fd2b29e73229.html>, zuletzt aktualisiert am 19.08.2022, zuletzt geprüft am 19.10.2023.

Coldewey, Devin (2015): Google's Self-Driving Cars Use Halloween to Learn to Recognize Costumed Kids. In: *NBC News*, 02.11.2015. Online verfügbar unter <https://www.nbcnews.com/tech/innovation/googles-self-driving-cars-use-halloween-learn-recognize-costumed-kids-n455901>, zuletzt geprüft am 20.10.2023.

Collie, Brian; Decker, Jordan; Fishman, Jamie; Wegscheider, Augustin K.; Wiesinger, Michael; Sridhara, Raj (2022): Mapping the Future of Autonomous Trucking. In: *BCG Global*, 24.10.2022. Online verfügbar unter <https://www.bcg.com/publications/2022/mapping-the-future-of-autonomous-trucks>, zuletzt geprüft am 19.10.2023.

ISO/TR ISO/TR 21186, 2021: Cooperative intelligent transport systems (C-ITS).

Daum, Timo (2021): Missing Link: Tesla, die Antriebswende und das Legacy-Problem der Autoindustrie. In: *heise online*, 17.10.2021. Online verfügbar unter <https://www.heise.de/hintergrund/Missing-Link-Tesla-die-Antriebswende-und-das-Legacy-Problem-der-Autoindustrie-6216061.html>, zuletzt geprüft am 16.10.2023.

Delhaes, Daniel (2023): Autonomes Fahren: Rückschlag fürs selbstfahrende Auto. In: *Handelsblatt*, 09.05.2023. Online verfügbar unter <https://www.handelsblatt.com/politik/deutschland/nahverkehr-mobileye-beantragt-keine-zulassung-fuer-autonomes-fahren/29138546.html>, zuletzt geprüft am 19.10.2023.

Deloitte Deutschland (2023): Urbane Mobilität und autonomes Fahren im Jahr 2035. Online verfügbar unter <https://www2.deloitte.com/de/de/pages/trends/urbane-mobilitaet-autonomes-fahren-2035.html>, zuletzt aktualisiert am 12.10.2023, zuletzt geprüft am 12.10.2023.

Detroit Free Press (2023): GM's plan to deploy self-driving Cruise Origin on hold as feds weigh exemption request. In: *Detroit Free Press*, 25.02.2023. Online verfügbar unter <https://eu.freep.com/story/money/cars/general-motors/2023/02/25/gm-factory-zero-cruise-origin/69893597007/>, zuletzt geprüft am 19.10.2023.

Digitale Stadt Hamburg (2023): Digitales Verkehrszeichenkataster. Online verfügbar unter <https://digital.hamburg.de/digitale-stadt/mobilitaet-und-energie/digitales-verkehrszeichenkataster-11128>, zuletzt aktualisiert am 18.10.2023, zuletzt geprüft am 18.10.2023.

Europäische Kommission (2020): Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU. A Foresight Study. Online verfügbar unter <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/42882>, zuletzt aktualisiert am 14.10.2023, zuletzt geprüft am 14.10.2023.

Europäisches Institut für Telekommunikationsnormen ETSI: Study on ITS Support for Pre-Crash based Applications. ETSI TR 103 832. Online verfügbar unter https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/103800_103899/103832/02.01.01_60/tr_103832v020101p.pdf, zuletzt geprüft am 12.10.2023.

Feess, Eberhard (2018): Free-Rider-Verhalten. In: *Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH*, 19.02.2018. Online verfügbar unter <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/free-rider-verhalten-33255>, zuletzt geprüft am 16.10.2023.

Forbes (2023): 12 Best Artificial Intelligence (AI) Stocks To Buy For 2023. In: *Forbes*, 05.10.2023, zuletzt geprüft am 14.10.2023.

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO; Center of Automotive Management (CAM) (2023): Experteninterviews zur Bestätigung, Validierung und Bewertung der identifizierten Herausforderungen. 8 Experteninterviews mit Vertretern aus der Automobilindustrie, Mobilitätswirtschaft und Öffentlichen Hand.

Gao, Xinyu; Wang, Zhijie; Feng, Yang; Ma, Lei; Chen, Zhenyu; Xu, Baowen (2023): Benchmarking Robustness of AI-Enabled Multi-sensor Fusion Systems: Challenges and Opportunities. Online verfügbar unter <https://arxiv.org/pdf/2306.03454.pdf>.

Gartner Research (2023): Hype Cycle for Transportation and Smart Mobility, 2023. Online verfügbar unter <https://www.gartner.com/en/documents/4536799>, zuletzt aktualisiert am 14.10.2023, zuletzt geprüft am 14.10.2023.

Geiger, Thomas (2023): BMW ermöglicht Überholen auf einen Blick. In: *Automobilwoche.de*, 27.04.2023. Online verfügbar unter <https://www.automobilwoche.de/online/bmw-neuer-funfer-uberholt-auf-einen-blick>, zuletzt geprüft am 19.10.2023.

Gilroy, Roger (2022): Embark Launches Nine Sites for Pilot Operations | Transport Topics. Online verfügbar unter <https://www.ttnews.com/articles/embark-launches-nine-sites-pilot-operations>, zuletzt aktualisiert am 06.11.2022, zuletzt geprüft am 19.10.2023.

GIZ (2022): Overview on China's 14th Five-Year Plans in the Transport Sector. Online verfügbar unter <https://transition-china.org/mobilityposts/overview-on-chinas-14th-five-year-plans-in-the-transport-sector/>, zuletzt aktualisiert am 30.09.2022, zuletzt geprüft am 19.10.2023.

Grünweg, Tom (2013): Selbststeuernder Wagen: Ausfahrt mit Autopilot. In: *DER SPIEGEL*, 09.09.2013. Online verfügbar unter <https://www.spiegel.de/auto/aktuell/autonomes-fahren-unterwegs-mit-einer-s-klasse-auf-autopilot-a-920803.html>, zuletzt geprüft am 20.10.2023.

Grupp, Michael (2022): Der Kampf um die Standards. Hg. v. Beschaffung aktuell. Online verfügbar unter <https://beschaffung-aktuell.industrie.de/einkauf/der-kampf-um-die-standards/#SnippetTab>, zuletzt geprüft am 13.9.23.

Häberle, Ludwig; Kille, Christian; Rank, Sebastian; Schmidt, Thorsten; Stölzle, Wolfgang (2023): Begegnung von Kapazitätsengpässen im Straßengüterverkehr. Fokus Personal. 1. Auflage. Göttingen: Cuvillier Verlag. Online verfügbar unter https://www.logistics-advisory-experts.ch/_files/ugd/e481fd_112fad6e5f90472583ac8bf1c74fdb59.pdf, zuletzt geprüft am 14.10.2023.

Hartmann, Katharina (2021): Unterwegs zum autonomen Fahren. Mit V2X-Kommunikation simulationsbasiert testen. In: *heise online*, 23.11.2021. Online verfügbar unter <https://www.heise.de/hintergrund/Unterwegs-zum-autonomen-Fahren-Mit-V2X-Kommunikation-simulationsbasiert-testen-6271962.html?seite=all>, zuletzt geprüft am 12.10.2023.

heidelberg.de (1993): Angsträume in Heidelberg. Das Sicherheitsempfinden von Frauen in ihrer Stadt. Kurzfassung. Online verfügbar unter <https://www.heidelberg.de/hd/HD/Rathaus/Gewaltpraevention+im+Staedtebau.html>, zuletzt aktualisiert am 19.10.2023, zuletzt geprüft am 19.10.2023.

Herrmann, Florian; Stegmüller, Sebastian; Block, Lukas; Potinecke, Thomas; Beinbauer, Wolfgang; Schnabel, Ulrich et al. (2023): Beschäftigungseffekte im Kfz-Gewerbe 2030/2040. e-mobil BW GmbH; Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO; Institut für Automobilwirtschaft (IfA). Online verfügbar unter <https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/e->

mobil_BW_Beschaeftigungseffekte_im_Kfz-Gewerbe_2030_2040.pdf, zuletzt geprüft am 12.10.2023.

Anhang

Heuberger, Sarah (2023): Vollautonomes Fahren wird auf Jahrzehnte eine Wunschvorstellung bleiben. In: *Business Insider*, 04.07.2023. Online verfügbar unter <https://www.businessinsider.de/gruenderszene/automotive-mobility/fernride-legal-counsel-volker-hartmann-autonomes-fahren-telefahren/>, zuletzt geprüft am 12.10.2023.

Hickmann, Helen; Koneberg, Filiz (2022): Die Berufe mit den aktuell größten Fachkräftelücken. In: *IW-Kurzbericht* (67). Online verfügbar unter https://www.iwkoeln.de/fileadmin/user_upload/Studien/Kurzberichte/PDF/2022/IW-Kurzbericht_2022-Top-Fachkr%C3%A4ftel%C3%BCcken.pdf, zuletzt geprüft am 12.10.2023.

Hietala, Akseli (2017): First-mover advantages and -disadvantages. Case study on Prospectum Oy. Online verfügbar unter <https://core.ac.uk/download/pdf/84799105.pdf>, zuletzt geprüft am 16.10.2023.

Hoffmann, Susann (2022): Für mehr Durchblick im Schilderwald: Verkehrszeichenkataster. Online verfügbar unter <https://blog.archikart.de/f-r-mehr-durchblick-im-schilderwald-verkehrszeichenkataster>, zuletzt aktualisiert am 18.10.2023, zuletzt geprüft am 18.10.2023.

Hong, Susan (2020): How Software Strategies Will Dominate Auto Industry. In: *EETimes Asia*, 22.09.2020. Online verfügbar unter <https://www.eetasia.com/how-software-strategies-will-dominate-auto-industry/>, zuletzt geprüft am 19.10.2023.

Höreth, M. (2021): Harmonisierung. In: *Bundeszentrale für politische Bildung*, 09.12.2021. Online verfügbar unter <https://www.bpb.de/kurz-knapp/lexika/das-europalexikon/177038/harmonisierung/>, zuletzt geprüft am 17.11.2023.

Howard, Dwight (2019): The Digital Twin: Virtual Validation In Electronics Development And Design. In: IEEE (Hg.): 2019 Pan Pacific Microelectronics Symposium (Pan Pacific). Kauai, Hawaii, USA, February 11-14, 2019. 2019 Pan Pacific Microelectronics Symposium (Pan Pacific). Kauai, HI, USA, 2/11/2019 - 2/14/2019. Eden Prairie, MN: Surface Mount Technology Association (SMTA), S. 1–9.

Inrix (2017): Deutsche Verschwenden 41 Stunden Im Jahr Bei Der Parkplatzsuche. Online verfügbar unter <https://inrix.com/press-releases/parking-pain-de/>, zuletzt aktualisiert am 17.10.2023, zuletzt geprüft am 19.10.2023.

ioko (2023): Autonome Fahrzeuge: Zeitenwende im europäischen Nahverkehr. Online verfügbar unter <https://ioki.com/autonome-fahrzeuge-zeitenwende-im-europaeischen-nahverkehr/>, zuletzt aktualisiert am 30.03.2023, zuletzt geprüft am 19.10.2023.

Juliussen, Egil (2020): Evolution of Autonomous Vehicle Use Cases.

Kalra, Nidhi; Paddock, Susan M. (2016): Driving to Safety. How Many Miles of Driving Would It Take to Demonstrate Autonomous Vehicle Reliability?: RAND Corporation.

Kani, Ali (2022): DRIVE Gains Industry Momentum With \$11 Billion Pipeline | NVIDIA Blog. Online verfügbar unter <https://blogs.nvidia.com/blog/2022/03/22/drive-orin-byd-production/>, zuletzt aktualisiert am 22.03.2022, zuletzt geprüft am 19.10.2023.

KBA (2023a): EU-Typgenehmigungen für Kraftfahrzeuge mit autonomer Fahrfunktion in Kleinserie. Online verfügbar unter https://www.kba.de/DE/Themen/Typgenehmigung/Autonomes_automatisiertes_Fahren/EU_Typgenehmigung/eu_typgenehmigung_node.html, zuletzt aktualisiert am 14.10.2023, zuletzt geprüft am 14.10.2023.

KBA (2023b): Nationale Betriebserlaubnis für Kraftfahrzeuge mit autonomer Fahrfunktion. Online verfügbar unter

https://www.kba.de/DE/Themen/Typgenehmigung/Autonomes_automatisiertes_Fahren/nationale_Betriebserlaubnis/nationale_betriebserlaubnis_node.html, zuletzt aktualisiert am 18.10.2023, zuletzt geprüft am 18.10.2023.

Klusak, Patrycja; Kraemer, Moritz; Vu, Huong (2022): First-mover disadvantage: the sovereign ratings mousetrap. In: *Financial Market* 31 (1), S. 3–44. DOI: 10.1111/fmii.12155.

Kommunalfabrik (2023): Verkehrszeichenkataster (kf-VKZ) zum Liegenschafts Informations System. Online verfügbar unter https://www.komfa.de/cms/index.php?module=view&action=liegenschaften_verkehrszeichenkataster, zuletzt aktualisiert am 18.10.2023, zuletzt geprüft am 18.10.2023.

König, R. (2023): Förderinstrumente als Beitrag zu einer zukunftsfähigen ÖPNV-Finanzierung. TU Dresden; Forschungsinformationssystem. Online verfügbar unter <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/519099/?clslid0=276646&clslid1=276651&clslid2=276890&clslid3=0>, zuletzt aktualisiert am 12.10.2023, zuletzt geprüft am 12.10.2023.

Korosec, Kirsten (2023): Cruise pauses all driverless robotaxi operations to 'rebuild public trust'. In: *TechCrunch*, 27.10.2023. Online verfügbar unter <https://techcrunch.com/2023/10/26/cruise-pauses-all-driverless-robotaxi-operations-to-rebuild-public-trust/?guccounter=1>, zuletzt geprüft am 17.11.2023.

KPMG (2020): 2020 Autonomous Vehicles Readiness Index. Online verfügbar unter <https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/xx/pdf/2020/07/2020-autonomous-vehicles-readiness-index.pdf>, zuletzt geprüft am 14.10.2023.

Kraftfahrtbundesamt (2023): Nationale Betriebserlaubnis für Kraftfahrzeuge mit autonomer Fahrfunktion. Online verfügbar unter https://www.kba.de/DE/Themen/Typgenehmigung/Autonomes_automatisiertes_Fahren/nationale_Betriebserlaubnis/nationale_betriebserlaubnis_node.html, zuletzt aktualisiert am 12.10.2023, zuletzt geprüft am 12.10.2023.

Kremp, Matthias (2023): Sensoren, Infotainment-Systeme, Steuergeräte. So schwierig ist Datenschutz im Auto. In: *DER SPIEGEL*, 12.01.2023. Online verfügbar unter <https://www.spiegel.de/netzwelt/gadgets/digitalisierung-so-schwierig-ist-es-persoenele-informationen-im-auto-zu-schuetzen-a-17437099-3b1e-4a03-8402-a78669e138d6>, zuletzt geprüft am 12.10.2023.

Krempf, Stefan (2021): Missing Link: Wie sich China zur Normungsweltmacht aufschwingen will. Hg. v. heise online. Online verfügbar unter <https://www.heise.de/hintergrund/Missing-Link-Wie-sich-China-zur-Normungsweltmacht-aufschwingen-will-6146295.html>, zuletzt geprüft am 13.9.23.

Kroth, Isabella (2023): Kritik an Car2X. Lebensrettende Technologie mit Mängeln. In: *Tagesschau*, 08.07.2023. Online verfügbar unter <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/technologie/car2x-technologie-autobauer-100.html>, zuletzt geprüft am 12.10.2023.

Kühl, Christiane (2022): China zieht beim autonomen Fahren das Tempo an. Hg. v. automotivET. Online verfügbar unter <https://www.automotiveit.eu/technology/autonomes-fahren/china-zieht-beim-autonomen-fahren-das-tempo-an-533.html>, zuletzt geprüft am 13.9.23.

KVV (2023): Testfeld Autonomes Fahren. Online verfügbar unter <https://taf-bw.de/das-testfeld/zielsetzung>, zuletzt aktualisiert am 14.10.2023, zuletzt geprüft am 14.10.2023.

Lengsfeld, Jörn (2023): Herausforderung. Online verfügbar unter <https://joernlengsfeld.com/de/definition/herausforderung/>, zuletzt aktualisiert am 18.10.2023, zuletzt geprüft am 18.10.2023.

Litman, Todd (2020): Autonomous Vehicle Implementation Predictions: Implications for Transport Planning
(AymqwRC7u88Y4JPvfiF2F37QKylC04248hLCdJAsh8xgOfe/dVJPV3XS3wLFca1ZMVOtnBfVjaCMTVudWM//5g4AAAB7eyJvcmlnaW4iOiJodHRwczovL3d3dy5nb29nbGV0YWdtYW5hZ2VyLmNvbTo0NDMiLCJmZWFOdXJlIjoieUJpdmFjeVNhbmRib3hBZHNBUElziwiZXhwaXJ5IjoxNjk1MTY3OTk5LCJpc1RoaXJkUGFydHkiOnRydWV9). Online verfügbar unter <https://trid.trb.org/view/1678741>.

LMC Automotive (2018): Autonomous Vehicles. The outlook for Autonomous Vehicle sales and their impact to 2050.

Maier, Benedikt; Reindl, Stefan; Block, Lukas; Borrmann, Daniel; Potinecke, Thomas (2023): Servicemarkt 2040. Perspektiven und Strategien für freie Werkstätten Szenarien für Marktvolumen und Beschäftigung. e-mobil BW GmbH; Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO; Institut für Automobilwirtschaft (IfA). Online verfügbar unter https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/e-mobilBW_Strategieoptionen_freie_Werkstaetten.pdf, zuletzt geprüft am 12.10.2023.

Malterer, Michael (2023): Autonomes Fahren: Wo steht Deutschland im internationalen Vergleich? In: »*Automobil Industrie*«, 22.06.2023. Online verfügbar unter <https://www.automobil-industrie.vogel.de/autonomes-fahren-gesetze-deutschland-usa-china-japan-welt-a-2e839c386c31de86345c27b98f910f9b/>, zuletzt geprüft am 14.10.2023.

MAN (2023): MAN Truck & Bus macht Stadtbusse mit Mobileye autonom. In: *MAN Truck & Bus SE*, 17.05.2023. Online verfügbar unter <https://press.mantruckandbus.com/corporate/de/man-truck--bus-macht-stadtbusse-mit-mobileye-autonom/>, zuletzt geprüft am 19.10.2023.

Markt Murnau (2023): Flexibler Ortsbus in Murnau. Online verfügbar unter <https://www.murnau.de/de/ortsbus.html>, zuletzt aktualisiert am 12.10.2023, zuletzt geprüft am 12.10.2023.

Marquardt, Christian (2023): Automatisierter MAN Elektrobus für München. Urban Transport Magazine. Online verfügbar unter <https://www.urban-transport-magazine.com/automatisierter-man-elektrobus-fuer-muenchen/>, zuletzt aktualisiert am 20.04.2023, zuletzt geprüft am 19.10.2023.

McKinsey (2019): Outlook on the automotive software and electronics market through 2030. In: *McKinsey & Company*, 09.07.2019. Online verfügbar unter <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/mapping-the-automotive-software-and-electronics-landscape-through-2030>, zuletzt geprüft am 19.10.2023.

McKinsey (2023): Autonomous driving's future. Convenient and connected. Online verfügbar unter <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/autonomous-drivings-future-convenient-and-connected>, zuletzt aktualisiert am 12.10.2023, zuletzt geprüft am 12.10.2023.

Mercedes-Benz (2023a): Automatisiertes Fahren. Mercedes-Benz Group Nachhaltigkeitsbericht 2022. Online verfügbar unter <https://nachhaltigkeitsbericht.mercedes-benz.com/2022/soziales/verkehrssicherheit/automatisiertes-fahren.html>, zuletzt aktualisiert am 13.07.2023, zuletzt geprüft am 12.10.2023.

Mercedes-Benz (2023b): DRIVE PILOT bedienen. EQS Limousine März 2022 MBUX. Online verfügbar unter <https://www.mercedes-benz.de/passengercars/services/manuals.html/eqs-limousine-2022-03-v297-mbox/drive-pilot/drive-pilot-bedienen>, zuletzt aktualisiert am 18.10.2023, zuletzt geprüft am 18.10.2023.

Mercedes-Benz (2023c): Mercedes-Benz erhält als weltweit erstes Automobilunternehmen Zertifizierung für SAE-Level 3-System für US-Markt. Online verfügbar unter <https://group.mercedes-benz.com/innovation/produktinnovation/autonomes-fahren/drive-pilot-nevada.html>, zuletzt aktualisiert am 11.10.2023, zuletzt geprüft am 12.10.2023.

MINDACT (2022): Aktuelle Studie: Zufahrtskontrolle mit schnell öffnenden Rollläden würde das Sicherheitsempfinden in Parkhäusern deutlich erhöhen. In: *Presseportal.de*, 23.03.2022. Online verfügbar unter <https://www.presseportal.de/pm/162221/5178514>, zuletzt geprüft am 19.10.2023.

Mobilikon (2022): Nationales Kompetenznetzwerk für nachhaltige Mobilität (NaKoMo). Online verfügbar unter <https://www.mobilikon.de/instrument/nationales-kompetenznetzwerk-fuer-nachhaltige-mobilitaet-nakomo>, zuletzt aktualisiert am 18.10.2023, zuletzt geprüft am 18.10.2023.

Motional (2023): Partnerships. Online verfügbar unter <https://motional.com/partnerships>, zuletzt aktualisiert am 18.10.2023, zuletzt geprüft am 19.10.2023.

MW Niedersachsen (2021): Land kauft 34 neue Züge für den Regionalverkehr in Niedersachsen. Online verfügbar unter <https://www.mw.niedersachsen.de/startseite/aktuelles/presseinformationen/land-kauft-34-neue-zuge-fur-den-regionalverkehr-in-niedersachsen-197736.html>, zuletzt aktualisiert am 18.10.2023, zuletzt geprüft am 18.10.2023.

NPM (2021): Digitalisierung des Mobilitätssektors – Erfahrungen aus dem Reallabor und abschließende Empfehlungen, zuletzt aktualisiert am 18.10.2023, zuletzt geprüft am 18.10.2023.

NTT DATA (2022): Automated Valet Parking (AVP). Online verfügbar unter <https://de.nttdata.com/insights/whitepapers/automated-valet-parking-avp>, zuletzt aktualisiert am 19.10.2023, zuletzt geprüft am 19.10.2023.

OECD (2022): OECD-Berichte zur Innovationspolitik: Deutschland 2022. Agile Ansätze für erfolgreiche Transformationen. Online verfügbar unter <https://www.oecd-ilibrary.org/sites/9d21d68b-de/index.html?itemId=/content/publication/9d21d68b-de>, zuletzt aktualisiert am 18.10.2023, zuletzt geprüft am 18.10.2023.

OICA (2023): 2022 statistics | www.oica.net. Online verfügbar unter <https://www.oica.net/category/production-statistics/2022-statistics/>, zuletzt aktualisiert am 17.11.2023, zuletzt geprüft am 17.11.2023.

Osterwalder, Alexander (2011): *Business Model Generation*. Ein Handbuch für Visionäre, Spielveränderer und Herausforderer. 1. Aufl. Frankfurt am Main: Campus Verlag GmbH (Business 2011). Online verfügbar unter <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=832895>.

Pillau, Florian (2023): Autonomes Auto: Baidu darf in Peking autonomes Ride-Hailing ohne Fahrer anbieten. In: *heise online*, 17.03.2023. Online verfügbar unter <https://www.heise.de/news/Autonomes-Auto-Baidu-darf-in-Peking-autonomes-Ride-Hailing-ohne-Fahrer-anbieten-7548841.html>, zuletzt geprüft am 19.10.2023.

Potinecke, Thomas; Block, Lukas; Bratzel, Stefan; Szupories, Matthias (2023): Deutschlands Position im internationalen Wettbewerb innovativer Fahrzeugtechnologien durch Normung und Standardisierung stärken. Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO; Center of Automotive Management (CAM).

Prahalad, C. K.; Hamel, G. (2006): The Core Competence of the Corporation. In: *Strategische Unternehmensplanung — Strategische Unternehmensführung*: Springer,

Berlin, Heidelberg, S. 275–292. Online verfügbar unter https://link.springer.com/chapter/10.1007/3-540-30763-X_14.

Anhang

Prawitz, Sven (2023): Kommentar: Das autonome Auto kommt nicht. In: »*Automobil Industrie*«, 30.01.2023. Online verfügbar unter <https://www.automobil-industrie.vogel.de/autonomes-fahren-radar-lidar-mercedes-bmw-entwicklung-kommentar-a-71ee4d9a5eba0e74cb1552337d607d79/>, zuletzt geprüft am 19.10.2023.

Qingdao, Matthias Kamp (2022): Schanghai will Chinas Zentrum für intelligentes Fahren werden. Hg. v. Neue Zürcher Zeitung. Online verfügbar unter <https://www.nzz.ch/wirtschaft/china-schanghai-will-zentrum-fuer-autonomes-fahren-werden-ld.1702193>, zuletzt geprüft am 13.9.23.

Qualcomm (2022): Qualcomm's Automotive Design-Win Pipeline Expands to \$30 Billion | Qualcomm. Online verfügbar unter <https://www.qualcomm.com/news/releases/2022/09/qualcomm-s-automotive-design-win-pipeline-expands-to--30-billion>, zuletzt aktualisiert am 19.10.2023, zuletzt geprüft am 19.10.2023.

Quanlin, Qiu (2023): Fully unmanned robotaxis to begin operations in Shenzhen. In: *China Daily*, 20.06.2023. Online verfügbar unter <https://www.chinadaily.com.cn/a/202306/20/WS64910450a310bf8a75d6ad66.html>, zuletzt geprüft am 12.10.2023.

Ropohl, Günter (2009): Allgemeine Technologie. eine Systemtheorie der Technik: Universitätsverlag Karlsruhe.

Schaal, Sebastian (2023): Bund und Hamburg erproben autonome E-Shuttles. In: *electrive*, 24.10.2023. Online verfügbar unter <https://www.electrive.net/2023/10/24/bund-und-hamburg-erproben-autonome-e-shuttles/>, zuletzt geprüft am 17.11.2023.

Schaal, Sebastian; Eisert, Rebecca (2015): Selbstfahrende Autos: Deutschland führend beim autonomen Fahren. In: *Wirtschaftswoche*, 21.08.2015. Online verfügbar unter <https://www.wiwo.de/unternehmen/auto/selbstfahrende-autos-deutschland-fuehrend-beim-autonomen-fahren/12217136-all.html>, zuletzt geprüft am 20.10.2023.

Schwarzer, Christoph M. (2022): Hochautomatisiertes Fahren. Level 3 bis 130 km/h zuerst bei Mercedes. In: *heise online*, 05.07.2022. Online verfügbar unter <https://www.heise.de/hintergrund/Hochautomatisiertes-Fahren-Level-3-bis-130-km-h-zuerst-bei-Mercedes-7162660.html>, zuletzt geprüft am 12.10.2023.

Seeger, Christoph (2023): Obstacle Fusion and Scene Interpretation for Autonomous Driving with Occupancy Grids. Doctoralthesis. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU). Online verfügbar unter <https://opus4.kobv.de/opus4-fau/frontdoor/index/index/docId/21351>.

SPIEGEL (2023): Nach mehreren Unfällen: US-Verkehrsbehörde setzt fahrerlose Fahrten von Cruise-Robotaxis aus. In: *DER SPIEGEL*, 24.10.2023. Online verfügbar unter <https://www.spiegel.de/wirtschaft/unternehmen/san-francisco-us-verkehrsbehoerde-setzt-fahrerlose-fahrten-von-cruise-robotaxis-aus-a-2f48d110-44f4-4b9d-93d1-2011681d7abf>, zuletzt geprüft am 17.11.2023.

sp-x (2023): Level-3-Fahrzeuge dürfen Tempo 130 fahren. In: *kfz-betrieb*, 04.01.2023. Online verfügbar unter <https://www.kfz-betrieb.vogel.de/level-3-fahrzeuge-duerfen-tempo-130-fahren-a-c5bc18087a6de7d2e0b5351f461de6b5/>, zuletzt geprüft am 12.10.2023.

Stagecoach (2023): Launch of UKs first autonomous bus service. Online verfügbar unter <https://www.stagecoachbus.com/news/national/2023/may/launch-of-uks-first->

autonomous-bus-service, zuletzt aktualisiert am 19.10.2023, zuletzt geprüft am 19.10.2023.

Anhang

Statistisches Bundesamt (2019): Personenverkehr. Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Transport-Verkehr/Personenverkehr/_inhalt.html, zuletzt aktualisiert am 12.08.2019, zuletzt geprüft am 12.10.2023.

Stegmüller, Sebastian; Werner, Maximilian; Kern, Mira; Birzle-Harder, Barbara; Götz, Konrad; Stein, Melina (2019): Akzeptanzstudie "Robocab". Autonome Mobilitätskonzepte aus Sicht der Nutzer. Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO. Online verfügbar unter <https://public-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/8cdc71f5-3475-430b-9bf2-b972883c59a0/content>, zuletzt geprüft am 12.10.2023.

Steininger, Udo (2022): Rechtliche Fragestellungen des automatisierten Fahrens. innocam.NRW. Online verfügbar unter https://www.innocam.nrw/wp-content/uploads/2023/01/Studie_innocamNRW_Gesetzgebung_des_hochautomatisierten_Fahrens_2023_01_11_final.pdf, zuletzt geprüft am 12.10.2023.

ISO ISO 21448, Januar 2019: Straßenfahrzeuge - Sicherheit der beabsichtigten Funktionalität.

strategy& (2022): Digital Auto Report 2021/22. Accelerating towards the "New Normal".

Stroh, Iris (2021): V2X-Kommunikation. China gibt den Ausschlag. Hg. v. Weka Fachmedien GmbH. elektroniknet.de. Online verfügbar unter <https://www.elektroniknet.de/automotive/wirtschaft/china-gibt-den-ausschlag.188572.html>, zuletzt aktualisiert am 02.08.2021, zuletzt geprüft am 20.10.2023.

tagesschau.de (2023): Fahrerlos durch San Francisco. In: *tagesschau.de*, 11.08.2023. Online verfügbar unter <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/unternehmen/google-waymo-cruise-robotaxis-100.html>, zuletzt geprüft am 16.10.2023.

Tagesspiegel (2023): Autonomes Fahren. Branche fordert Klarheit bei Zulassung. In: *Tagesspiegel Background Verkehr & Smart Mobility*, 06.04.2023. Online verfügbar unter <https://background.tagesspiegel.de/mobilitaet/autonomes-fahren-branche-fordert-klarheit-bei-zulassung>.

Thiemel, Arnulf (2023): Car2X. Wie Kommunikationstechnik Unfälle komplett verhindern könnte. ADAC Technik Zentrum. Online verfügbar unter <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/ausstattung-technik-zubehoer/assistenzsysteme/car2x/>, zuletzt aktualisiert am 04.07.2023, zuletzt geprüft am 20.10.2023.

Tohen, Filip (2023): Going Virtual In Automotive Electronics Development. Online verfügbar unter <https://semiengineering.com/going-virtual-in-automotive-electronics-development/>, zuletzt aktualisiert am 04.05.2023, zuletzt geprüft am 18.10.2023.

Tziampazis, Stefanos; Kopp, Oliver; Weyrich, Michael (2023): Distributed Integration of Electronic Control Units for Automotive OEMs: Challenges, Vision, and Research Directions. In: IEEE (Hg.): 2023 IEEE 20th International Conference on Software Architecture Companion (ICSA-C). 2023 IEEE 20th International Conference on Software Architecture Companion (ICSA-C). L'Aquila, Italy, 3/13/2023 - 3/17/2023: IEEE, S. 296–300.

Uber Freight (2021): The future of self-driving technology in trucking. Online verfügbar unter <https://insights.uberfreight.com/the-future-of-av-trucking>, zuletzt aktualisiert am 19.10.2023, zuletzt geprüft am 19.10.2023.

uber.com (2023): Waymo and Uber Partner to Bring Waymo's Autonomous Driving Technology to the Uber Platform. Online verfügbar unter <https://investor.uber.com/news-events/news/press-release-details/2023/Waymo-and-Uber-Partner-to-Bring-Waymos-Autonomous-Driving-Technology-to-the-Uber-Platform/default.aspx>, zuletzt aktualisiert am 19.10.2023, zuletzt geprüft am 19.10.2023.

Vargas, Jorge; Alswiss, Suleiman; Toker, Onur; Razdan, Rahul; Santos, Joshua (2021): An Overview of Autonomous Vehicles Sensors and Their Vulnerability to Weather Conditions. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 21 (16). DOI: 10.3390/s21165397.

VDA (2022): VDA_5733_JB_2022_DE_WEB_RZ. Online verfügbar unter https://www.vda.de/dam/jcr:228b75d9-4a44-461b-af89-0464a0225be2/VDA_5733_JB_2022_DE_WEB_RZ.pdf?mode=view, zuletzt geprüft am 17.11.2023.

VDA (2023): VDA Jahresbericht 2022. Online verfügbar unter <https://www.vda.de/de/aktuelles/artikel/2023/das-hat-uns-im-letzten-Jahr-bewegt>, zuletzt aktualisiert am 14.10.2023, zuletzt geprüft am 14.10.2023.

VDI (2020): Stand der Homologation bei Autonomen Fahrzeugen. Online verfügbar unter <https://www.technik-in-bayern.de/mobilitaet/autonomes-fahren/stand-der-homologation-bei-autonomen-fahrzeugen>, zuletzt aktualisiert am 14.10.2023, zuletzt geprüft am 14.10.2023.

VDV (2021): Innovationspapier zur automatisierten und fahrerlosen Personenbeförderung. Online verfügbar unter <https://www.vdv.de/innovationspapier-autonomes-fahren.pdf>, zuletzt geprüft am 14.10.2023.

Vector (2023a): Car2x/V2X Know-how. Online verfügbar unter <https://www.vector.com/de/de/know-how/v2x/#c96244>, zuletzt aktualisiert am 18.10.2023, zuletzt geprüft am 18.10.2023.

Vector (2023b): Car2x- / V2X-Kommunikation. Online verfügbar unter <https://www.vector.com/de/de/know-how/v2x/#c96247>, zuletzt aktualisiert am 12.10.2023, zuletzt geprüft am 12.10.2023.

VM Baden-Württemberg (2022): Baden-Württemberg treibt Digitalisierung im Verkehrssektor voran. Online verfügbar unter <https://vm.baden-wuerttemberg.de/de/service/presse/pressemitteilung/pid/baden-wuerttemberg-treibt-digitalisierung-im-verkehrssektor-voran>, zuletzt aktualisiert am 18.10.2023, zuletzt geprüft am 18.10.2023.

Vogel, Michael (2023): V2X-Kommunikation bekommt Rückenwind. Mehr Konnektivität im Straßenverkehr, 16.01.2023. Online verfügbar unter <https://www.automotiveit.eu/mobility/v2x-kommunikation-bekommt-rueckenwind-193.html>, zuletzt geprüft am 12.10.2023.

Waymo (2021): Waymo Safety Report - 2021. Online verfügbar unter <https://ltad.com/resources/waymo-safety-report-2021.html>, zuletzt aktualisiert am 19.10.2023, zuletzt geprüft am 19.10.2023.

Waymo (2022): Introducing the 5th-generation Waymo Driver: Informed by experience, designed for scale, engineered to tackle more environments. Online verfügbar unter <https://waymo.com/blog/2020/03/introducing-5th-generation-waymo-driver.html>, zuletzt aktualisiert am 19.10.2023, zuletzt geprüft am 19.10.2023.

Weber, Harri (2023): Robotaxis 'do not belong in the city of Los Angeles,' lawmaker says. In: *TechCrunch*, 25.10.2023. Online verfügbar unter <https://techcrunch.com/2023/10/25/robotaxis-do-not-belong-in-the-city-of-los-angeles-lawmaker-says/>, zuletzt geprüft am 17.11.2023.

Wilkins, Andreas (2023a): Waymo. Eine Million Meilen automatisierte Fahrten ohne schwere Unfälle. In: *heise online*, 02.03.2023. Online verfügbar unter <https://www.heise.de/news/Waymo-Eine-Million-Meilen-automatisierte-Fahrten-ohne-schwere-Unfaelle-7532791.html>, zuletzt geprüft am 12.10.2023.

Wilkins, Andreas (2023b): Automatisiertes Fahren. GM baut Fahrassistenzsystem Ultra Cruise ein. In: *heise online*, 08.03.2023. Online verfügbar unter <https://www.heise.de/news/Weitgehend-selbstfahrend-GM-bringt-Fahrassistenz-Ultra-Cruise-auf-den-Markt-7539543.html>, zuletzt geprüft am 12.10.2023.

Wilkins, Andreas (2023c): Autonomes Fahren. Swiss Re bescheinigt Waymo sicheres Fahren. In: *heise online*, 06.09.2023. Online verfügbar unter <https://www.heise.de/news/Autonomes-Fahren-Swiss-Re-bescheinigt-Waymo-sicheres-Fahren-9296908.html>, zuletzt geprüft am 12.10.2023.

Witte, Jens (2023): Unfall in San Francisco. Robotaxi kollidiert mit Feuerwehrauto - Firma muss Fahrzeugflotte reduzieren. In: *DER SPIEGEL*, 19.08.2023. Online verfügbar unter <https://www.spiegel.de/auto/san-francisco-robotaxi-kollidiert-mit-feuerwehrauto-firma-muss-fahrzeugflotte-reduzieren-a-22f7f855-7d51-42cb-8d41-d95de0b81591>, zuletzt geprüft am 12.10.2023.

Zang, Shizhe; Ding, Ming; Smith, David; Tyler, Paul; Rakotoarivelo, Thierry; Kaafar, Mohamed Ali (2019): The Impact of Adverse Weather Conditions on Autonomous Vehicles: How Rain, Snow, Fog, and Hail Affect the Performance of a Self-Driving Car. In: *IEEE Veh. Technol. Mag.* 14 (2), S. 103–111. DOI: 10.1109/MVT.2019.2892497.

ZF (2023): ZF announces partnership with mobility provider Beep to bring new-generation autonomous Level 4 shuttle to U.S. market. Online verfügbar unter https://press.zf.com/press/en/releases/release_49664.html, zuletzt aktualisiert am 18.10.2023, zuletzt geprüft am 19.10.2023.

8 **Abbildungsverzeichnis**

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: AVF im Hype Cycle for Transportation and Mobility nach Gartner Research..... | 6 |
| Abbildung 2: Design und Aufbau der Studie..... | 8 |
| Abbildung 3: Zentrale AVF-Wertschöpfungsfelder in Abhängigkeit des Betriebsmodells..... | 10 |
| Abbildung 4: Kumulierte Innovationsstärke „Autonomes Fahren Level 2, 2+ und 3“ (Auswahl)..... | 12 |
| Abbildung 5: Erfolgsfaktoren für die produktive Skalierung von Anwendungsfällen ... | 18 |
| Abbildung 6: Übersicht der Herausforderungsfelder | 25 |
| Abbildung 7: Methodisches Vorgehen zur Identifikation relevanter Herausforderungsfelder und zentraler Herausforderungen | 25 |
| Abbildung 8: Rangliste der zehn als am relevantesten identifizierten Herausforderungsfelder über alle Anwendungsfälle hinweg | 36 |
| Abbildung 9: Rangliste der sechs als am relevantesten identifizierten Herausforderungsfelder für den AVF-Anwendungsbereich „Ownership“ mit Level 4 .. | 39 |
| Abbildung 10: Rangliste der sechs als am relevantesten identifizierten Herausforderungsfelder für den AVF-Anwendungsbereich „Ownership“ mit Level 3 .. | 39 |
| Abbildung 11: Rangliste der sechs als am relevantesten identifizierten Herausforderungsfelder für den AVF-Anwendungsbereich „Sharing“ | 40 |
| Abbildung 12: Rangliste der sechs als am relevantesten identifizierten Herausforderungsfelder für den AVF-Anwendungsbereich „Logistics“ | 41 |
| Abbildung 13: Die drei zentralen Herausforderungen zur Schaffung zielführender Rahmenbedingungen | 42 |
| Abbildung 14: Handlungsfelder, um Deutschland zum Innovationsstandort für das automatisierte und vernetzte Fahren zu machen..... | 45 |

9 Tabellenverzeichnis

| | |
|---|----|
| Tabelle 1: Anwendungsfälle von AVF-Systemen im Personen- und Güterverkehr (Auswahl) | 9 |
| Tabelle 2: Übersicht führender Akteure bei der Kommerzialisierung autonomer L4-Sharing-Angebote (Auswahl) | 14 |
| Tabelle 3: Kompetenzverteilung deutscher und internationaler Akteure in den Wertschöpfungsfeldern des autonomen und vernetzen Fahrens (Auswahl) | 16 |
| Tabelle 4: Bewertungsmatrix zur Identifikation von Fokus-Anwendungsfällen für den Innovationsstandort Deutschland | 23 |

10 Abkürzungsverzeichnis

| | |
|---------------------|--|
| 3GPP | 3rd Generation Partnership Project (weltweite Kooperation von Standardisierungsgremien für die Standardisierung im Mobilfunk) |
| 3GPP C-V2X o. C-V2X | (Cellular V2X) Funkstandard auf Basis von Mobilfunk nach 3GPP-Standard für Fahrzeuge zur Realisierung von V2X-Anwendungen |
| AFGBV | Autonome-Fahrzeuge-Genehmigungs-und-Betriebs-Verordnung |
| ASAM | Association for Standardization of Automation and Measuring Systems (Arbeitskreis für die Standardisierung von Automatisierungs- und Messsystemen) |
| AVF | Automatisiertes und vernetztes Fahren |
| BMDV | Bundesministerium für Digitales und Verkehr |
| BOKraft | Verordnung über den Betrieb von Kraftfahrunternehmen im Personenverkehr |
| DSRC | Dedicated Short Range Communication (Variante zur Umsetzung von V2X mit sehr kleiner Kommunikationszone, wird in Europa als ITS-G5 bezeichnet) |
| ETA | Expertenkreis Transformation der Automobilwirtschaft |
| ETSI | European Telecommunications Standards Institute (Europäisches Institut für Telekommunikationsnormen) |
| EU | Europäischen Union |
| ISO | International Organization for Standardization (Internationale Organisation für Normung) |
| ITS-G5 | Intelligent Transport Systems G5 (Bezeichnung für DSRC in Europa) |
| KBA | Kraftfahrtbundesamt |
| MDS | Mobility Data Space (Datenraum für den Mobilitätssektor) |
| ODD | Operational Design Domain (Bereich, in dem automatisierte Fahrfunktionen zum Einsatz kommen) |
| PBefG | Personenbeförderungsgesetz |
| Pkw | Personenkraftwagen |
| SAE | Society of Automotive Engineers |
| StVG | Straßenverkehrsgesetz |

| | |
|--------------------------------------|--|
| UNECE WP.29 | United Nations Economic Commission for Europe, Working Party 29 – World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations (Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa, Arbeitsgruppe 29 – Weltforum für die Harmonisierung von Fahrzeugvorschriften) |
| V2I | Vehicle-to-Infrastructure (Datenaustausch zwischen einem Fahrzeug und infrastrukturellen Einrichtungen) |
| V2V | Vehicle-to-Vehicle (Datenaustausch zwischen einem Fahrzeug und anderen Fahrzeugen) |
| V2X | Vehicle-to-Everything (Sammelbegriff für V2I, V2V und generell Technologien für Fahrzeuge zum Austausch von Daten) |
| VDV | Verband Deutscher Verkehrsunternehmen |
| WLAN | Wireless Local Area Network (drahtloses lokales Netzwerk) |
| WLAN IEEE 802.11p (DSRC bzw. ITS-G5) | Funkstandard auf Basis von WLAN nach IEEE-802.11-Standard dediziert für Pkw zur Realisierung intelligenter Verkehrssysteme |

Impressum

Kontakt

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft
und Organisation IAO

Lukas Block

Tel. +49 711 970-2173

lukas.block@iao.fraunhofer.de

Center of Automotive Management (CAM)

Prof. Dr. Stefan Bratzel

Tel. +49 2202 28577-0

stefan.bratzel@auto-institut.de

DOI (kostenlose PDF-Version)

<http://dx.doi.org/10.24406/publica-2196>

Titelbild

© ribalka yuli – stock.adobe.com



Fertigstellung der Studie: Dezember 2023

Erstveröffentlichung: Februar 2024



Kontakt

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft
und Organisation IAO

Lukas Block

Tel. +49 711 970-2173

lukas.block@iao.fraunhofer.de

Center of Automotive Management (CAM)

Prof. Dr. Stefan Bratzel

Tel. +49 2202 28577-0

stefan.bratzel@auto-institut.de