

[ZAHLEN.DATEN]

Matthias Teichmann¹, Ralf Ihrig¹, Liss Böckler², Marvin Baumann³, Martin Kagerbauer³, Christian Klinkhardt³, Lucas Schuhmacher³, Sofie Ehrhardt⁴, Rico Auerswald⁵, Mirjam Fehling-Kaschek⁶, Florian Lüttner⁶, Jonas Schulze⁸, Klaus Bengler⁸, Jens Ziehn⁷

Was fehlt zur flächendeckenden Automatisierung im ÖPNV?



Automatisierte Shuttlebusse im ÖPNV gelten als wesentlicher Baustein für die urbane Mobilität der Zukunft. Doch trotz umfangreicher Pilotprojekte steht die flächendeckende Einführung vor wesentlichen Hürden. Im Rahmen der Vorbereitung eines Forschungsprojekts wurde differenziert unter Expertinnen und Experten erhoben, wo die Umsetzung derzeit noch auf Herausforderungen stößt.

Einleitung

Automatisierter öffentlicher Personennahverkehr (ÖPNV) soll in den kommenden Jahren in Deutschland Realität werden. Das meint konkret den Betrieb mit automatisierten Fahrzeugen, die keine menschliche Überwachung im Fahrzeug mehr benötigen, sondern höchstens die Unterstützung einer externen Leitstelle beziehungsweise einer »technischen Aufsicht« erfordern. Die Dringlichkeit ist hoch:

Der ÖPNV leidet bereits heute unter Personalknappheit, und in den kommenden Jahren wird sich der Fachkräftemangel weiter verschärfen. Gleichzeitig sollen im Zuge der Mobilitätswende Menschen zunehmend auf das private Auto verzichten und auf den nachhaltigeren öffentlichen Verkehr (ÖV) umsteigen (siehe u.a. auch Doll u.a., 2025). So ist das Thema sowohl Gegenstand der Strategie der vorherigen Bundesregierung für autonomes Fahren im Straßenverkehr (Bundesministerium für Digitales und Verkehr, 2024), wie auch des Koalitionsver-



Wir werden die Voraussetzungen dafür schaffen, dass autonomes Fahren in den Regelbetrieb kommt.«

Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD

Hoch- oder vollautomatisiertes Fahren im ÖV, insbesondere im ÖPNV, bietet ein hohes Potenzial zur Effizienzsteigerung und Angebotsverbesserung – etwa durch flexible, bedarfsoorientierte Betriebskonzepte, erweiterte Betriebszeiten und den Einsatz in bisher wenig angebundenen Gebieten.

Auch heute sind bereits automatisierte Shuttlebusse im Testbetrieb unterwegs. Der Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) führt auf seiner Seite¹ über 40 Pilotprojekte zum automatisierten Shuttlebus-Betrieb in Deutschland auf (vgl. Abb. 2). Jedoch benötigen diese Fahrzeuge noch menschliche Sicherheitsfahrerinnen oder -fahrer im Fahrzeug, die das System überwachen und notfalls eingreifen. Ein solcher Betrieb ermöglicht die Erprobung wichtiger technischer Funktionen – Personalengpässe werden dadurch aber nicht aufgelöst.

Das kann erst geschehen, wenn die menschliche Aufsicht nicht mehr durchgängig im Fahrzeug anwesend sein muss, sondern das Fahrzeug auch au-

→ Kontakt

- ¹ schwarzenberg.tech
GmbH, **matthias**
@schwarzenberg.tech
- ² Interlink GmbH
- ³ Karlsruher Institut für
Technologie (KIT)
- ⁴ FZI Forschungs-
zentrum Informatik
- ⁵ Fraunhofer IVI
- ⁶ Fraunhofer EMI
- ⁷ Fraunhofer IOSB
- ⁸ TU München

trages der neuen Bundesregierung (CDU, CSU und SPD, 2025).

¹ vdv.de/liste-autonome-shuttle-bus-projekte.aspx

| | | | | |
|---|----------------------------------|------------|-----------|---|
| | | | | |
| Automatisierungsstufe 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Lenkung / Gas&Bremse entweder / oder | beides vollständig automatisiert | | | |
| menschliche Aufsicht durchgängig | nach Warnung | unkritisch | nie nötig | |
| Betriebsbereich beschränkt | unbeschränkt | | | |
| deutscher Rechtsrahmen ✓ | ✗ | | | |

Abb. 1: Überblick über die fünf Stufen der Automatisierung nach VDA / SAE. Derzeitiger Fokus der Entwicklungen liegt insbesondere auf dem Erreichen von Stufe 4, wo die menschliche Aufsicht im Fahrzeug entfallen kann, und unkritische betriebliche Sonderfälle auch von einer von Ferne zugeschalteten technischen Aufsicht (TA) übernommen werden können. Bis Stufe 5 bleiben die Systeme aber begrenzt auf definierte Betriebsbereiche, angedeutet durch das Symbol der Faltkarte. Erst ab Stufe 5 sollen Systeme ohne Beschränkungen »überall« einsatzfähig sein.

Bergewöhnliche Situationen vollständig selbst auflösen kann, und nur noch in weniger kritischen Fällen externe Unterstützung anfordern muss. Als Zielbild gemäß des deutschen Rechtsrahmens soll eine technische Aufsicht mehrere Fahrzeuge gleichzeitig betreuen können.

Um die Fähigkeiten solcher automatisierter Systeme zu strukturieren, werden diese in sogenannte »Stufen der Automatisierung« nach VDA und SAE eingeteilt (s. Abb. 1, sowie SAE International, 2016). Bis zu Stufe 3 muss eine menschliche Aufsicht durchgängig im Fahrzeug verfügbar sein, um – wenn notwendig – eingreifen zu können. Erst ab Stufe 4 sind keine kritischen Eingriffe in die Fahrtaufgabe mehr erforderlich, und somit keine physische Präsenz einer Aufsichtsperson im Fahrzeug notwendig. Dann kann zum Beispiel eine sogenannte »technische Aufsicht« (TA) in einer Leitstelle bei Bedarf zugeschaltet werden, um Betriebshindernisse aufzulösen.

Heute hingegen findet der Betrieb solcher Systeme überwiegend nach VDA/SAE-Stufe 3 statt, bei denen eine Sicherheitsfahrerin oder ein Sicherheitsfahrer die Automatisierung durchgängig überwachen muss, und im Notfall eingreifen soll.

Expertenbefragung

Um die Herausforderungen der Branche zu klären, und Entwicklungsbedarfe zu analysieren, wurde zwischen September und Dezember 2024 eine Befragung von Expertinnen und Experten durchgeführt, die im Bereich Automatisierung von Fahrzeugen für den ÖPNV tätig sind. Insgesamt wurden $n = 29$ unabhängige Rückmeldungen unterschied-

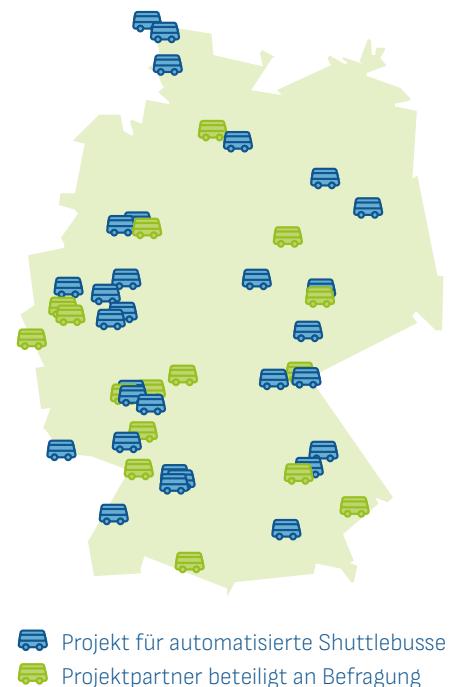


Abb. 2: Überblick über Projekte zum automatisierten Shuttlebus-Betrieb in Deutschland (Quelle: VDV), mit Hervorhebung von Projekten, deren Partner bekanntermaßen an der Befragung teilgenommen haben.

licher deutschlandweit tätiger Organisationen gesammelt, die an Shuttlebus-Projekten beteiligt sind. Die Organisationszugehörigkeit konnte vertraulich angegeben werden, zudem war eine Einsortierung in Tätigkeitsfelder möglich.

Eine Karte mit Shuttlebus-Projekten (nach VDV), an denen die teilnehmenden Organisationen beteiligt waren, findet sich in Abb. 2; eine Übersicht der abgedeckten Tätigkeitsfelder ist in Abb. 3 dargestellt.

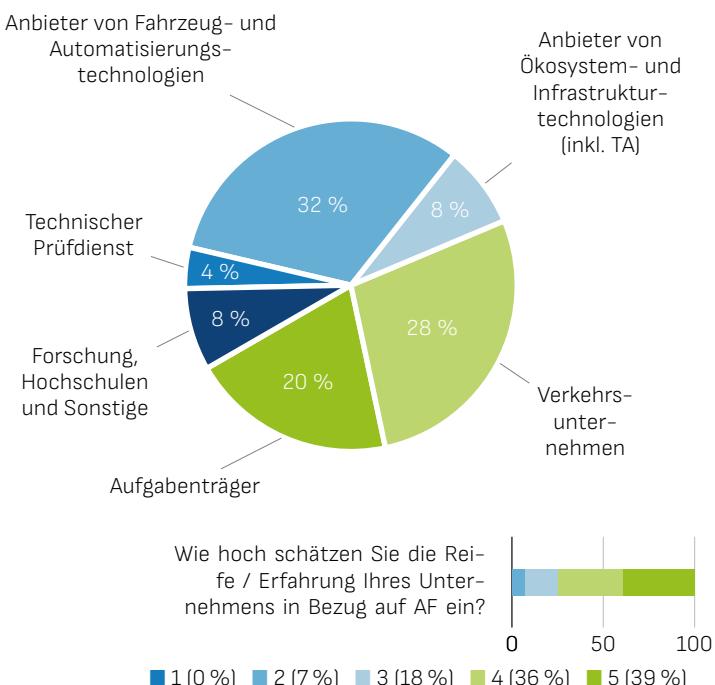


Abb. 3: Verteilung der Organisationen über die Befragten der Studie und Selbsteinschätzung zur fachlichen Erfahrung der Organisation.

Die Befragung wurde im Kontext einer Initiative zur Entwicklung eines Förderprojektvorschlags für das Fachprogramm »DNS der zukunftsfähigen Mobilität: Digital – Nachhaltig – Systemfähig«² des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) durchgeführt. Im Nachgang der Befragung haben sich mehrere der teilnehmenden Organisationen einer entsprechenden Projektskizze angeschlossen; die Autorinnen und Autoren der Studie und die befragten Organisationen sind allerdings disjunkt, und die Beteiligung an der Projektskizze, die zwischenzeitlich durch Ministerium und Projektträger zum Vollantrag aufgerufen wurde, war inhaltlich getrennt von den Rückmeldungen zur Befragung.

Zwischenzeitlich wurde durch das BMWK (seit April: BMWE) in Zusammenarbeit mit dem Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV, seit April: BMV) die Initiative »Ökosystem Mobilität 4.0«³ ins Leben gerufen und auf der Hannover Messe im März 2025 erstmalig vorgestellt, die sich unter anderem mit diesen Herausforderungen befassen soll, aber unabhängig von der Durchführung der Befragung ist.

Allgemeine Herausforderungen

Zunächst wurde eine Sortierung der Herausforderungen erhoben (Ergebnisse in Abb. 4), von 1 (am un-

wichtigsten) bis 9 (am wichtigsten), wobei als unbedeutend empfundene Themen aus der Priorisierung entfernt werden konnten. Im Ergebnis ist festzustellen, dass erhebliche Unterschiede in der Priorisierung der jeweiligen Aspekte bestehen. Insgesamt als eher unkritisch wahrgenommen werden Aspekte der Nutzerakzeptanz und der Mensch–Maschine–Schnittstelle, wohingegen Erprobungsaufwände, die Rolle der technischen Aufsicht (TA) sowie Sonder- und Unfälle und rechtliche Hürden wesentlich höher eingesortiert wurden.

→ Fazit 1

Neben fehlender Technologiereife sind rechtliche Hürden und die Zulassung die größten Herausforderungen.

Die mit Abstand am höchsten priorisierte Herausforderung stellt die Technologiereife dar, die in Abb. 13 noch einmal detaillierter aufgeschlüsselt dargestellt wird. Demnach wird der höchste Entwicklungsbedarf bei der Automatisierungstechnologie gesehen, als »heute grundsätzlich fertig« hingegen am ehesten die Routenplanung. Insgesamt überwiegt aber bei allen genannten Punkten die Perspektive, dass noch mindestens moderater Entwicklungsbedarf für die Anwendung im automatisierten ÖV verbleibt.

→ Fazit 2

Es existiert noch ein hoher Entwicklungsbedarf bei den Technologien für durchgehende Anwendung und Verfügbarkeit im automatisierten öffentlichen Personennahverkehr.

Fragengruppe »Akzeptanz«

Weitere Einblicke ergeben sich aus den vertiefenden Auswertungen der einzelnen Fragengruppen. So werden die Aspekte aus der Fragengruppe »Akzeptanz« (Abb. 6) zwar nicht einhellig, aber deutlich überwiegend als hinreichend abgedeckt bewertet.

Rückmeldungen im Freitext umfassen den Hinweis, dass die »derzeitige Akzeptanz in Deutschland [...] noch genauer erfasst werden« und »in Aufklärung und Bildung zu den [Vorteilen] investiert werden« müsse; hierbei liegt der Bedarf aber eher auf spezifischen Auslegungen (etwa Innenraumbeobachtung) und der systematischen Schaffung von Akzeptanz. Eine generelle Akzeptanz für Automatisierung wird – sofern die Technologie sich als funktionierend er-

² www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/fahrzeug-und-systemtechnologien

³ oekosystemmobilitaet40.de

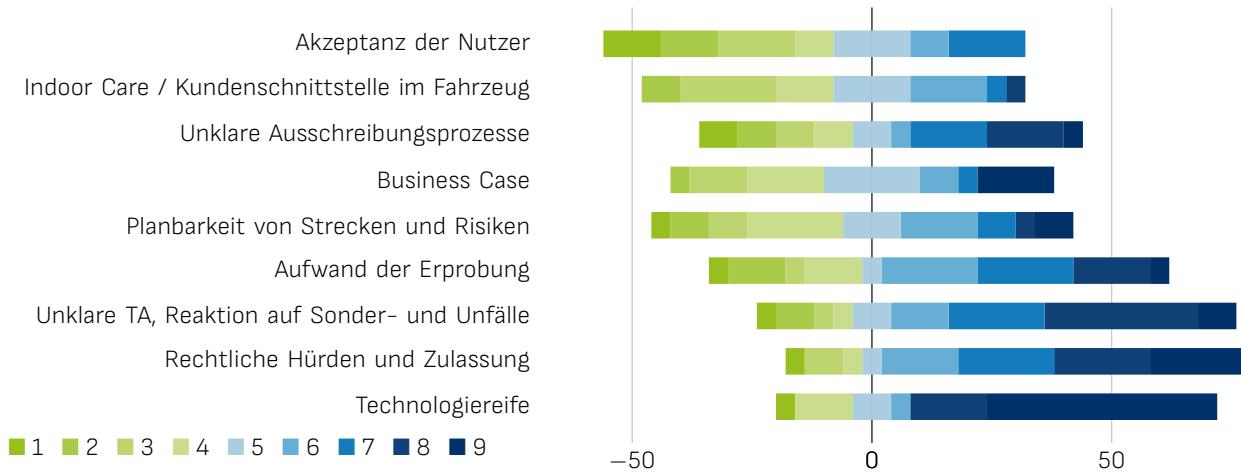
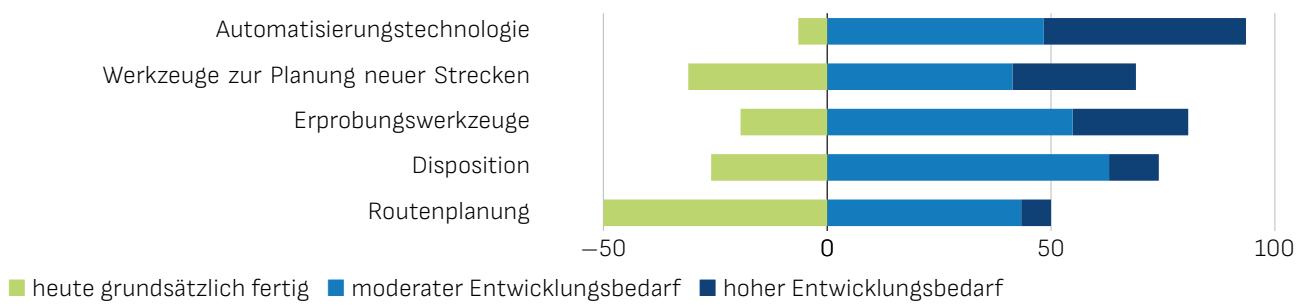


Abb. 4: »Bitte sortieren Sie die heutigen Herausforderungen aus Ihrer Sicht« auf einer Skala von 1 bis 9.



heute grundsätzlich fertig ■ moderater Entwicklungsbedarf ■ hoher Entwicklungsbedarf

Abb. 5: »Wie sehen Sie die Reifegrade der jeweiligen Technologien für Anwendung im automatisierten ÖV?«

weist – in den Rückmeldungen als gegeben vorausgesetzt, auch unter Verweis auf einschlägige Studien zum Thema. Dabei wird auch auf die Projektfamilie PAVE⁴ verwiesen, die sich mit Akzeptanzfragen von Automatisierung in der Bevölkerung in Europa, den USA und dem Vereinigten Königreich befasst.

Während die grundsätzliche Akzeptanz überwiegend als absehbar betrachtet wird, kristallisieren sich in den Antworten Detailaspekte der Umsetzung heraus, die die Akzeptanz maßgeblich formen. Zu diesen zählt unter anderem die Barrierefreiheit, Bedarfsgerechtigkeit, und die frühzeitige Einbindung von Bürgerinnen und Bürgern in die Ausgestaltung. Ferner wird darauf verwiesen, dass auch seitens der Mitarbeitenden in den Verkehrunternehmen die Akzeptanz der neuen Technologie, gerade angesichts beruflicher Disruptionen, ein kritischer zu berücksichtigender Faktor ist.

→ Fazit 3

Eine überwiegende grundsätzliche Akzeptanz in der Bevölkerung für automatisierte Fahrfunktionen wird vorausgesetzt. Im Detail hängt die Akzeptanz aber deutlich von der Umsetzung ab.

Fragengruppe »Ausschreibefähigkeit«

Differenzierter sind die Rückmeldungen in Bezug auf Ausschreibefähigkeit (Abb. 7). Kompetenzen zur Ausschreibung und Einführung werden sehr unterschiedlich bewertet, insbesondere für kommunenübergreifende Ausschreibeprozesse und Betriebsbereichsgenehmigungen werden derzeit noch wesentliche Lücken gesehen.

Zu sonstigen Faktoren, die die Ausschreibefähigkeit begrenzen, wird wiederholt angeführt, dass die Planbarkeit eines automatisierten ÖPNV-Betriebs derzeit als unzureichend gesehen wird. Dazu zählen Unklarheiten zu den benötigten personellen Betriebsabläufen, Rechten, Pflichten und Qualifikationen, sowie insbesondere Prozesse für Störungen im Betrieb, Aufgaben der technischen Aufsicht, und der Einsatz von Vernetzung und Kommunikation.

⁴ pavecampaign.org

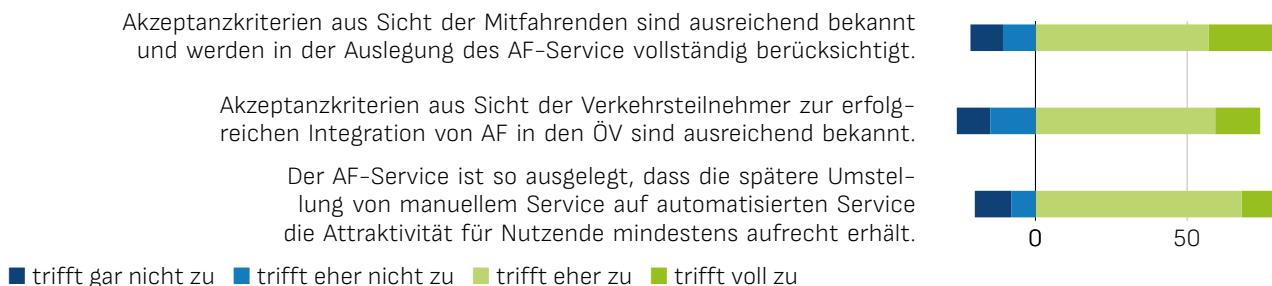


Abb. 6: Fragengruppe »Akzeptanz«.

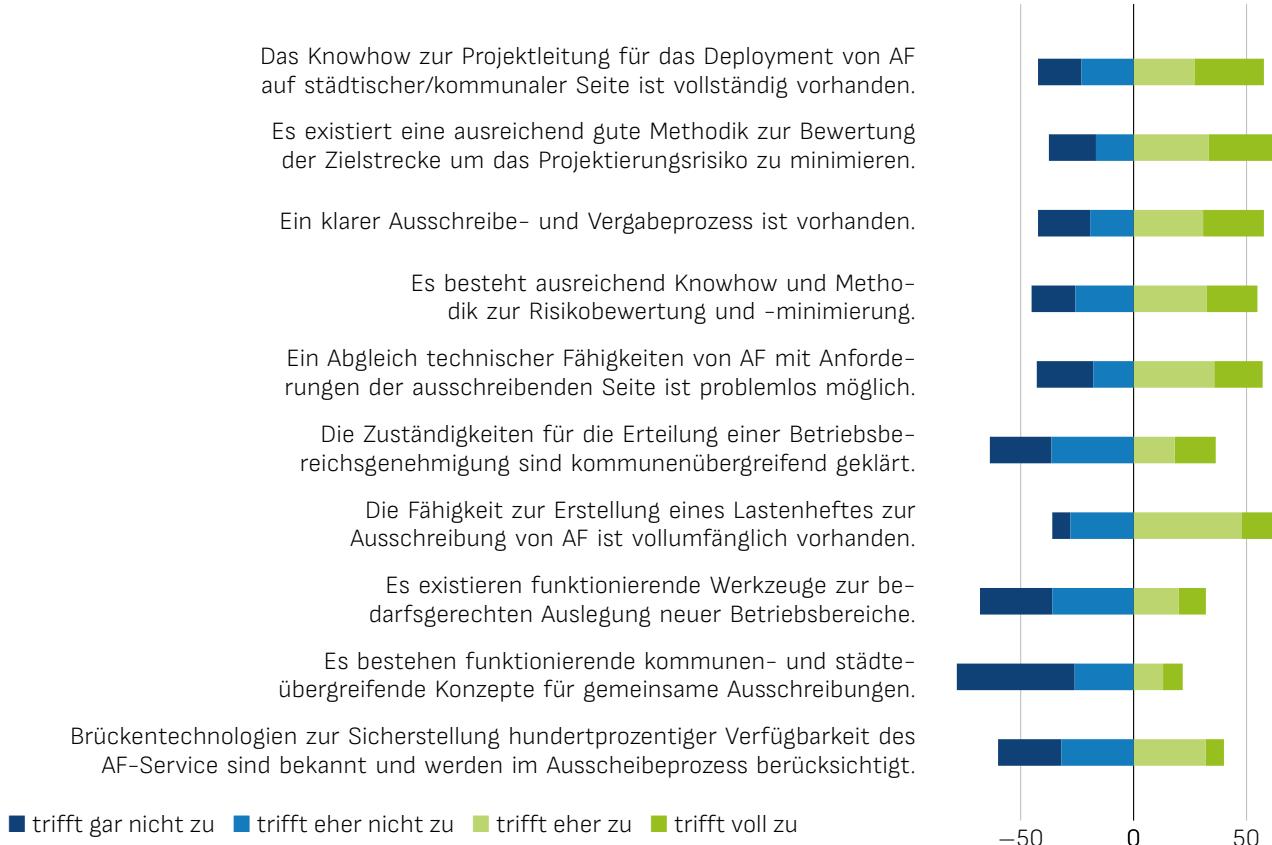


Abb. 7: Fragengruppe »Ausschreibefähigkeit«.

Auch wird angeführt, dass noch wesentliche rechtliche Fragen zur Ausschreibung von automatisiert fahrenden Fahrzeugen im ÖPNV durch Aufgabenträger ungeklärt sind. Insbesondere müssen das Vergaberecht und das Kartellrecht beachtet werden. Nur wenn eine Kooperationspartnerschaft über einen transparenten und verbindlichen Prozess die Beschaffung unter übereinstimmenden Bedingungen gemeinsam durchführt, können die rechtlichen Anforderungen erfüllt werden.

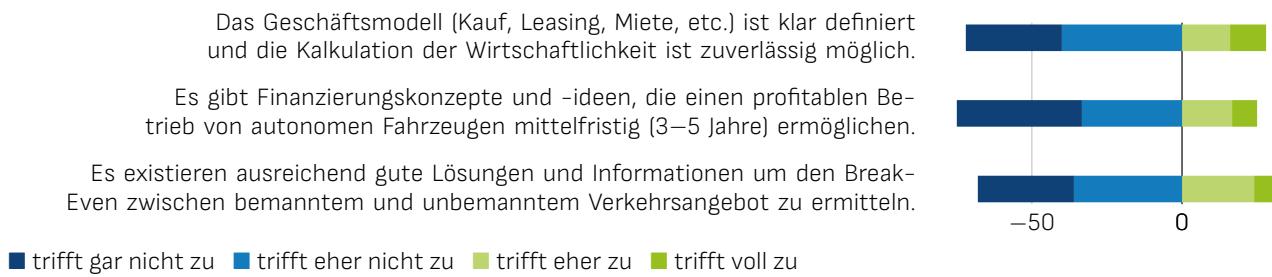
Es wird auch angeführt, dass die Offenheit von Verwaltungen für die gemeinsame Arbeit an automatisierten ÖPNV-Konzepten gesteigert werden muss. Auch der Ausbau der internationalen Kooperation für gemeinsame Lernprozesse wird als wesentlicher Faktor betrachtet.

→ Fazit 4

Aufgabenträger wie Kommunen und Städte sind nicht übergreifend ausschreibfähig, mögliche Skaleneffekte können nicht genutzt werden.

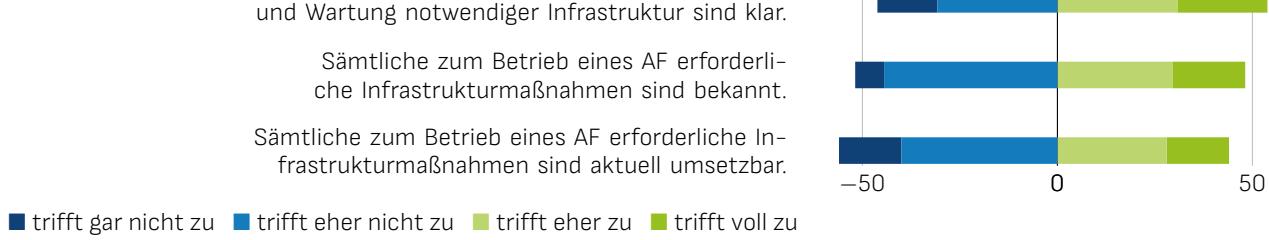
Fragengruppe »Finanzierung«

Der Themenbereich Finanzierung wird insgesamt von den Befragten als herausfordernd eingeschätzt. Für die Mehrheit ist eine klare Definition eines Geschäftsmodells aktuell nicht möglich und die Wirtschaftlichkeit ist nicht zuverlässig kalkulierbar. Es mangelt an Finanzierungskonzepten und -ideen, die



■ trifft gar nicht zu ■ trifft eher nicht zu ■ trifft eher zu ■ trifft voll zu

Abb. 8: Fragengruppe »Finanzierung«.



■ trifft gar nicht zu ■ trifft eher nicht zu ■ trifft eher zu ■ trifft voll zu

Abb. 9: Fragengruppe »Infrastrukturelle Anforderungen«.

einen profitablen Betrieb von autonomen Fahrzeugen mittelfristig ermöglichen. Es braucht gemäß der Mehrheit der Befragten noch mehr und bessere Lösungsansätze und Informationen, um den Break-Even zwischen bemannten und unbemannten Verkehrsangeboten zu ermitteln.

Bei der Einschätzung der Befragten ist zu berücksichtigen, dass der Einsatz autonom fahrender Fahrzeuge sowohl als Bestandteil des ÖPNV als auch im Rahmen rein privatwirtschaftlich organisierter und finanziert Mobilitätsangebote erfolgen kann. In beiden Fällen, also unabhängig von der Finanzierung, unterliegt die gewerbliche Personenbeförderung in Deutschland einem strengen regulatorischen Rahmen, der im Personenbeförderungsgesetz (PBefG) (Bundesrepublik Deutschland, 2024) verankert ist. Dieses Gesetz regelt unter anderem die Genehmigungspflicht für den Linien- und Gelegenheitsverkehr sowie die Anforderungen an Betrieb, Sicherheit und soziale Standards. Auch Mobilitätsformen wie klassische Taxiverkehre und gebündelter Bedarfsverkehr/On-Demand-Angebote fallen unter diese Regulierung. Behörden besitzen weitreichende Steuerungs- und Eingriffsrechte, etwa bei der Festlegung von Betriebsgebieten, Mindestentgelten oder Sozialstandards, auch bei privatwirtschaftlich finanzierten Verkehren. Die Wahl des Geschäfts-/Finanzierungsmodells für den Einsatz autonomer Fahrzeuge stellt also eine grundlegende strategische Entscheidung mit weitreichenden Implikationen für die regulatorische Einbindung, die betriebliche Ausgestaltung sowie die langfristige wirtschaftliche Tragfähigkeit dar. Im öffentlichen

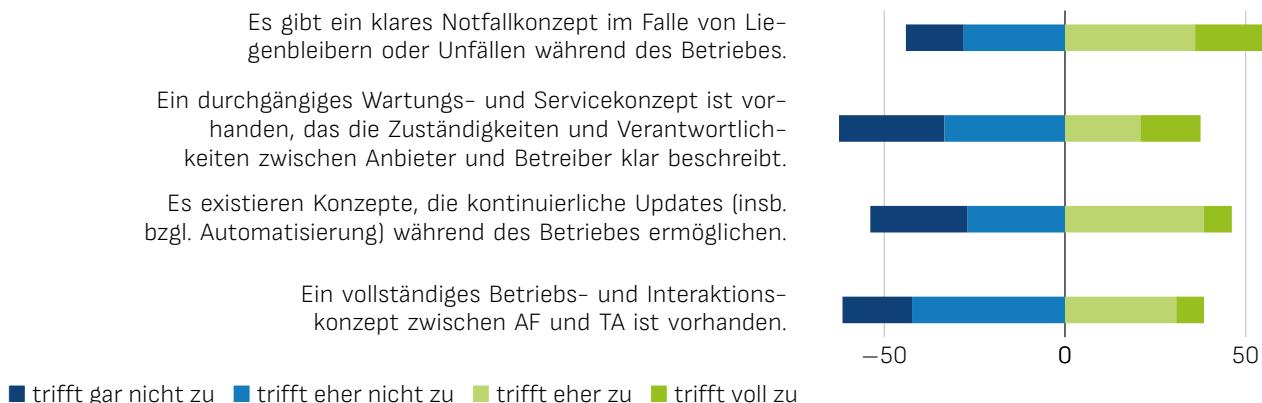
Diskurs in Deutschland dominiert aus verschiedenen Gründen der Einsatz als Teil des ÖPNV (Bundesministerium für Digitales und Verkehr, 2024). Der öffentliche Verkehr in Deutschland wird durch eine Kombination aus Fahrgeldeinnahmen und staatlicher Finanzierung (Bund, Länder, Kommunen) getragen (Roland Berger/Intraplan/Florenus im Auftrag des VDV, 2021). Trotz hoher Investitionen in klassische ÖPNV-Infrastruktur fehlt es momentan gemäß zweier Befragter an einer zielgerichteten und regelmäßigen Finanzierung für Fahrzeuge mit automatischer Fahrfunktion und neue Mobilitätsformen wie On-Demand-Angebote. Es braucht ein klares politisches Commitment auf Bundesebene für langfristige Planungssicherheit.

→ Fazit 5

Businessmodelle und Finanzierungskonzepte sind noch nicht ausgereift und zeigen keine ausreichende Kosten-deckung.

Fragengruppe »Infrastrukturelle Anforderungen«

In Abb. 9 werden Einschätzungen zum Thema Infrastruktur dargestellt. Zunächst wurde die Frage nach der Verantwortlichkeit bei der Umsetzung, dem Betrieb und der Wartung der Infrastruktur gestellt. Es zeigt sich ein gegensätzliches Bild: Ein Teil sieht die Verantwortung klar definiert, während ein noch größerer Anteil der Aussage überhaupt nicht zustimmt.



■ trifft gar nicht zu ■ trifft eher nicht zu ■ trifft eher zu ■ trifft voll zu

Abb. 10: Fragengruppe »Operations, Betriebskonzept, Überwachung«.

Die Meinungen unterscheiden sich auch innerhalb der Stakeholdergruppen stark.

Ein ähnliches Bild zeigt sich bei der Frage nach der Bekanntheit der nötigen Infrastrukturmaßnahmen. Allerdings schließen sich weniger Befragte einer eindeutigen Einschätzung an.

Bei der Frage nach der Umsetzbarkeit der Maßnahmen gibt es eine Tendenz zu der Aussage, dass diese noch nicht möglich ist. Generell sind Anbieter von Systemen eher überzeugt, dass alles geregelt und umsetzbar sei, während die Aufgabenträgerseite kritischer ist. Ein stärkerer Austausch und eine verbesserte Wissensverbreitung zwischen den Akteuren sind daher notwendig.

In den Freitextantworten finden sich weitere Hinweise auf infrastrukturelle Herausforderungen, darunter die unterschiedlichen Verantwortlichkeiten für Straßeninfrastruktur, Telekommunikationsinfrastruktur, sowie Fahrzeug- und Betriebsinfrastruktur, durch die erhebliche Kommunikationsaufwände entstehen. Es wird wiederholt festgehalten, dass die »gewachsene« Infrastruktur der urbanen Räume ein besonders herausforderndes Umfeld darstellt, und Neubauprojekte dringend Automatisierungsfähigkeit mitdenken sollten.

Unterschiedlich wahrgenommen wird die Frage, wie stark sich automatisierte Fahrzeuge von Infrastruktur abhängig machen sollten, angesichts der erwarteten Aufwände, diese auszubauen und zu warten. Während einige Befragte hohen Infrastrukturbedarf erwarten, wird durch andere ausdrücklich bezweifelt, dass stark Infrastruktur-abhängige Lösungen zukunftsfähig sind. Allgemein wird festgehalten, dass Anforderungen an die Infrastruktur heute nur unzureichend bekannt sind.

→ Fazit 6

Zum Betrieb eines automatisierten Fahrzeugs erforderliche Infrastrukturmaßnahmen sind aktuell nicht vollständig umsetzbar und wenig standardisiert.

Fragengruppe »Operations, Betriebskonzept, Überwachung«

Die in Abb. 9 dargestellten Ergebnisse dieser Fragengruppe zeigen eine insgesamt große Bandbreite, wobei sich ein wahrgenommener Mangel an Operations-, Betriebs- und Überwachungskonzepten abzeichnet.

Notfallkonzepte scheinen bei den Befragten in gleichen Teilen zu existieren und zu fehlen. Gleichermaßen kann auch für weitere, für den Betrieb notwendige Konzepte angenommen werden. Somit sollte hier auf einen Austausch hingearbeitet werden, vorhandene Konzepte zur Diskussion zu stellen, diese gemeinsam zu verbessern und gegebenenfalls zu erweitern und im weiteren Verlauf für die Branche zu standardisieren.

Hinsichtlich Wartungs- und Servicekonzepten als auch Updateprozessen gibt die Mehrheit noch offene Informationsbedarfe an.



Die Verantwortlichkeiten für Straßen-Infrastruktur, Telekommunikations-Infrastruktur, Fahrzeug- bzw. Betriebs-Infrastruktur liegen in verschiedenen Händen und bedürfen intensiver Abstimmungs- und Koordinierungsmaßnahmen.«

Rückmeldung einer Prüforganisation

Die Mehrheit gibt zudem Informationsbedarfe bei Betriebs- und Interaktionskonzepten zwischen selbstfahrenden Fahrzeugen und technischer Aufsicht an.

In den Detailantworten wurde darauf verwiesen, dass die Schaffung von Konzepten und Prozessen nur dann wirksam sein kann, wenn auch Kompetenzen bei Betrieben und deren Mitarbeitenden aufgebaut werden, diese Prozesse anzuwenden. Die Notwendigkeit von Schulungen wurde wiederholt herausgestellt. Als wichtiger Aspekt wurde betont, dass Prozesse mit großen Flotten von Fahrzeugen skalieren müssen. Als herausfordernde Prozesse wurden die Aufgaben der Leitstelle und Fernüberwachung, die Arbeitsabläufe der technischen Aufsicht, sowie Notfall- und Servicekonzepte benannt.

→ Fazit 7

Ein vollständiges Betriebs- und Interaktionskonzept zwischen automatisierten Fahrzeugen und technischer Aufsicht, inklusive Service- und Wartungskonzepten sowie Brückentechnologien wie Remote- und Teleoperation, fehlen momentan.

sung und Betrieb überwiegend als leicht bis sehr optimistisch.

Bewertung des Optimismus nach Tätigkeitsfeldern

Die zuvor genannten Fragengruppen sind so strukturiert, dass eine zustimmende Beantwortung der Fragen (trifft eher / voll zu) eine optimistische Perspektive auf den aktuellen Stand der Möglichkeiten darstellt, wohingegen eine Ablehnung (trifft gar nicht / eher nicht zu) eine eher pessimistische Perspektive darstellt.

Entsprechend kann eine Aufschlüsselung der Antworten nach den jeweiligen Tätigkeitsfeldern, dargestellt in Abb. 12, eine Abschätzung geben, wie optimistisch die Befragten aus den jeweiligen Tätigkeitsfelder auf den Fortschritt der Automatisierung blicken. Dargestellt sind die (gewichteten) Anzahlen der jeweiligen Einzelantworten auf die Fragen, um die Verteilung möglichst wenig zu verzerrn, da nicht alle Befragten alle Fragenblöcke beantworten konnten, und nicht alle Tätigkeitsfelder gleichmäßig vertreten waren (s. Abb. 3).

Es zeigt sich, dass die technischen Prüfdienste am optimistischsten auf die Vorbereitung zum automatisierten Fahren blicken, gefolgt von den Anbietern von Systemen für die technische Aufsicht.

Von den größten Gruppen der Befragten, den Anbietern von Fahrzeug- und Automatisierungstechnologien, Verkehrsunternehmen und Aufgabenträgern, kommt ein deutlich skeptischeres Bild auf die Herausforderungen. Insbesondere die Aufgabenträger sehen, dass die verbleibenden Herausforderungen in der Bilanz der Fragen deutlich überwiegen.

Noch pessimistischer blicken lediglich die Anbieter der Ökosystem- und Infrastrukturtechnologien auf den Stand zum automatisierten Fahren, die allerdings einen deutlich geringeren Anteil der Antworten ausmachen. Von ihnen werden kaum Aspekte als abschließend gelöst wahrgenommen.

Bewertung möglicher Maßnahmen zur Lösung der Herausforderungen

Um konkrete Lösungswege diskutieren und bewerten zu können, die eine potentielle Grundlage für gezielte künftige Projektaktivitäten darstellen, wurde ein spezifisches Zielbild skizziert (s. Box »Zur Diskussion gestelltes Zielbild«). Dieses beschreibt die Vision eines digitalen Ökosystems kompatibler Werkzeuge und Produkte, das einen durchgängigen Prozess von der Planung bis zur Zulassung der Fahrzeuge ermöglicht (vgl. auch Luchmann u. a., 2024).

Fragengruppe »Zulassung und gesetzliche Anforderungen«

Die Antworten zu Zulassung und gesetzlichen Anforderungen, dargestellt in Abb. 11, ergeben wiederum ein differenzierteres Bild. Auffällig ist, dass – im Gegensatz zur großen Mehrheit der Rückmeldungen in der Befragung – die Zuständigkeiten für die Erteilung von Betriebsbereichsgenehmigungen von niemandem als völlig ungeklärt eingeschätzt werden. Hier überwiegen deutlich die optimistischeren Einschätzungen.

Prozess und Kriterien für die Betriebsbereichszulassung werden von den Befragten dieser Fragegruppe im Vergleich am kritischsten beurteilt – ebenso wie andere prozessbezogene Fragestellungen. Dies unterstreicht den bestehenden Handlungsbedarf in diesem Bereich. Besonders hervorgehoben wird dabei eine unzureichende Kenntnis der UN/ECE-Regelung Nr. 107 (UN/ECE, 2015), insbesondere bei den »neuen« Herstellern. Diese Regelung enthält die »Einheitlichen Bestimmungen für die Genehmigung von Fahrzeugen der Klassen M2 und M3 hinsichtlich ihrer allgemeinen Konstruktionsmerkmale«. Dabei beziehen sich die Klassen M2 und M3 auf Kraftomnibusse mit bis bzw. mehr als acht Fahrgastplätzen.

Demgegenüber bewerten die Befragten den Stand der gesetzlichen Rahmenbedingungen für Zulas-

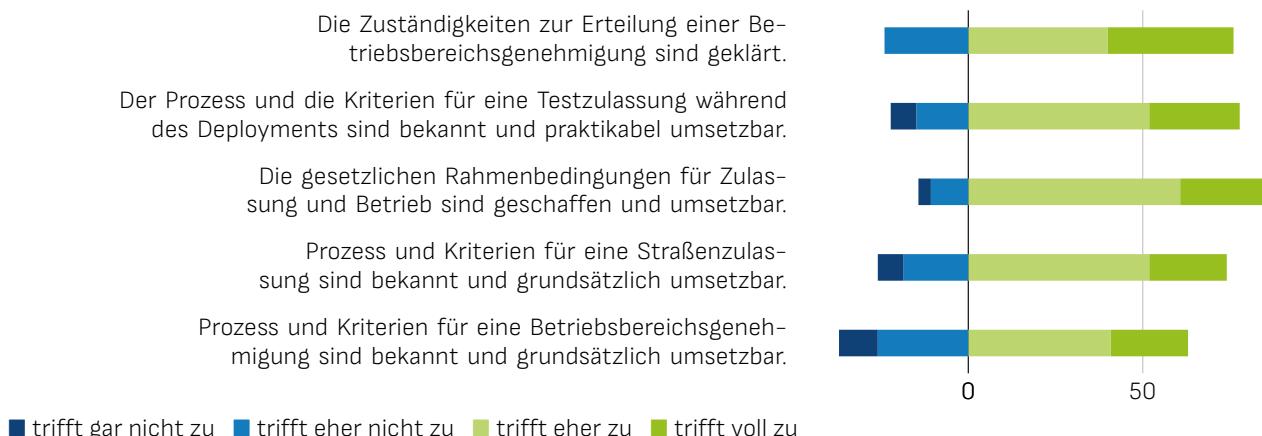


Abb. 11: Fragengruppe »Zulassung und gesetzliche Anforderungen«.

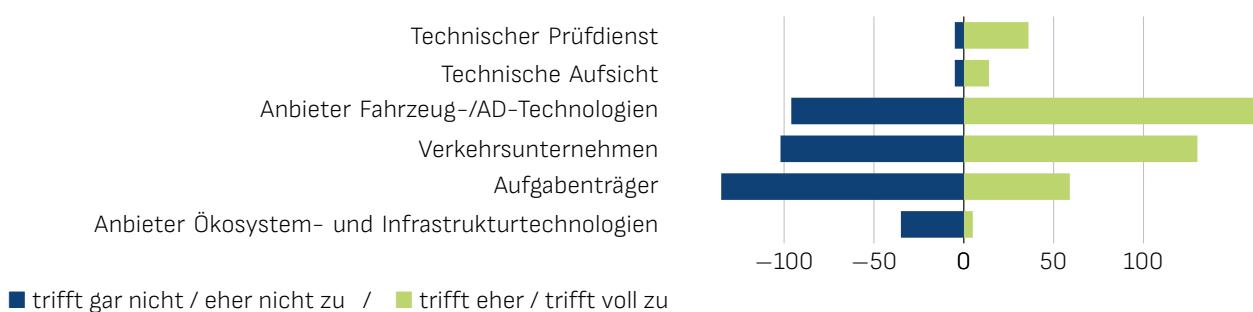


Abb. 12: Rückmeldungen auf die Fragengruppen nach Tätigkeitsfeldern, wobei die Antworten »gar nicht« bzw. »voll« doppelt gewichtet wurden.

Dieses Ökosystem soll etwa Ausschreibungen, Inbetriebnahme, Freigabe und Wirtschaftlichkeitsabschätzungen mit digitalen Werkzeugen unterstützen, und dazu insbesondere digitale Zwillinge des Betriebsbereichs niederschwellig zugänglich machen, in denen virtuell und realitätsnah der Betrieb erprobt werden kann.

Einheitliche Kategorisierungen zu Einsatzumgebungen (ODD) ermöglichen die Bündelung von Ausschreibungen von Städten und Kommunen mit vergleichbaren Anforderungen.

Basierend auf diesem Zielbild wurden Teilespektre dessen herausgegriffen und in Einzelbewertungen hinterfragt. Ferner wurde eine Abschätzung eingeholt, bis zu welcher Jahreszahl eine Einführung von mindestens 10.000 automatisierten Fahrzeugen im ÖPNV erwartet wird – einmal ohne entsprechende Skalierungsmaßnahmen, und einmal mit diesen.

Die Ergebnisse dieser Fragen sind in Abb. 13 dargestellt. Dabei zeigt sich eine überwiegend positive Bewertung, dass dieses Zielbild »etwas« oder »sehr« zur Lösung der empfundenen Herausforderungen beitragen würde.

Als stärkste Skalierungsmaßnahme wurde die Entwicklung einer Kategorisierung von Strecken nach

Einsatzbereichen (ODD) empfunden, anhand derer vergleichbare Einsatzumgebungen identifiziert und beispielsweise für Ausschreibungen genutzt werden können. Die Möglichkeit der überregionalen Bündelung von Ausschreibungen selbst allerdings wurde nur von einer im Vergleich geringeren Anzahl der Befragten als »sehr nützlich« eingeschätzt. Da mehr Personen die Streckenkategorisierung als »sehr nützlich« eingestuft haben, scheint diese über die Bündelung von Ausschreibungen hinaus für sie weitere Vorteile zu bergen.

Die Detailrückmeldungen zum Thema stellten dar, dass eine Kategorisierung der Strecken wesentlich auf der herstellerseitigen ODD-Abschätzung der automatisierten Fahrzeuge beruhen muss, auch unter Verweis auf den entsprechenden Standard ASAM OpenODD⁵, der im April 2025, und damit nach Abschluss der Befragung, veröffentlicht wurde. Ferner wurde festgestellt, dass Werkzeuge zur Erzeugung einer solchen Kategorisierung niederschwellig nutzbar sein müssen, um verbreitet angewendet zu werden. Eine Digitalisierung von Infrastruktur und Karten, sowie die Integration kurzfristiger Maßnahmen, wie Baustellen oder Groß-Veranstaltungen, wurden als wesentlich betrachtet.

⁵ www.asam.net/standards/detail/openodd/

→ Zur Diskussion gestelltes Zielbild

Betrachten Sie bitte die Vision eines von »Ende zu Ende« digitalisierten Gesamtprozesses von Städten/Kommunen, über Betreiber bis hin zu den Anbietern von Automatisierungs-Technologie und Brückentechnologien.

Ein Ökosystem kompatibler digitaler Werkzeuge und Produkte...

- ... ermöglicht eine gemeinsame städte- und kommunenübergreifende Ausschreibung und Umsetzungsplanung.
- ... reduziert den Aufwand für die Inbetriebnahme und Freigabe automatisierter Fahrzeuge und ggf. notwendiger Brückentechnologien durch Standardisierung, Digitalisierung und Automatisierung auf ein Minimum.
- ... modelliert und indiziert die erforderlichen Aspekte für einen profitablen Betrieb (Akzeptanz, Effizienz, Finanzierungsoptionen etc.) quantitativ.
- ... schafft einfachere Rahmenbedingungen für den profitablen Betrieb über übertragbare Prozesse und Verfahren sowie technische Lösungen.

In digitalen Zwillingen der Einsatzumgebung können Systeme entwickelt und realitätsnah virtuell erprobt werden. Grenzfälle und Engpässe im Betrieb werden frühzeitig sichtbar und können adressiert werden, bevor sie in der Praxis erstmalig eintreten. Servicekonzepte und Umsetzungen der technischen Aufsicht können realitätsnah exploriert werden – individuell durch Stakeholder oder, durch definierte Schnittstellen, gemeinsam mit Lösungsanbietern.

Darüber hinaus können Kommunen und Städte ihre Einsatzumgebungen (geforderte ODD) kartieren und klassifizieren lassen, und bei gleicher oder ähnlicher Klassifizierung Ausschreibungen mit anderen Städten und Kommunen bündeln. Beförderungskonzepte können optimiert werden, auch in Hinblick auf die Identifikation von Teilstrecken, die gute Bedingungen zur Automatisierung bieten. Finanzierungsoptionen für den Business-Case einer automatisierten Strecke können gesucht und gefunden werden, dank quantitativer Prognosen, wie sich der Betrieb in der Praxis gestalten wird.

Überwiegend als nützlich oder sehr nützlich, aber ausnahmsweise auch einmal als explizit kontraproduktiv wurde der automatisierte Abgleich zwischen solchen Streckenanforderungen und Systemanbietern für automatisierte Fahrzeuge bewertet. Als Grund dafür wurde angeführt, dass eine zu streckenspezifische Auslegung von Fahrzeugen dazu führen könnte, dass die breite Einsetzbarkeit im dringend benötigten Transfer vom ländlichen in den urbanen Raum nicht gegeben sein könnte.

Andere Rückmeldungen begrüßen hingegen die Synergieeffekte in der gebündelten Ausschreibung und die erreichbare Transparenz bezüglich Anforderungen. Auch wird erwartet, dass die gebündelte Nachfrage ein wirtschaftlich vertretbares Angebot befördert; gleichwohl wird angeführt, dass die initialen finanziellen Aufwände für die Beschaffung dadurch allein nicht gelöst werden können.

Die vorbereitende Betriebsbereichsgenehmigung auf Grundlage digitaler Zwillinge wird ebenfalls positiv bewertet, insbesondere durch die Möglichkeit, schon früh »verschiedene Szenarien und Testfahrten [durchführen zu können] und Schwierigkeiten der Strecke [...] schneller [und] nicht erst im Betrieb« identifizieren zu können. Allerdings sollten solche digitale Zwillinge nicht die alleinige Grundlage einer Zulassung darstellen.

Immer noch positiv, aber in geringerem Anteil als »sehr nützlich« bewertet wurden die Monetarisie-

rung von Daten über Datenmarktplätze, und die Prognose von Nutzungsformen und Nutzungsakzeptanz. Dies geschieht konsistent mit den vorherigen Rückmeldungen, nach denen die Befragten die Akzeptanz unter allen offenen Herausforderungen als die geringste bewerteten.

Insgesamt zeigt sich eine deutliche Verkürzung der erwarteten Einführungsjahre, sofern als hilfreich empfundene Maßnahmen ergriffen werden. Während ohne aktive Skalierungsmaßnahmen die optimistischste Rückmeldung eine Einführung von 10.000 automatisierten Fahrzeugen im Jahre 2030 sieht, und die meisten Befragten 2034 schätzen (mitunter sogar 2048), sieht die Mehrheit der Befragten mit entsprechenden Maßnahmen eine Erreichung dieser Umfänge bis 2029 als realistisch an, im pessimistischen Fall bis 2039.

→ **Fazit 8**

Ohne zusätzliche Skalierungsmaßnahmen ist mit einem nennenswerten automatisierten Fahrbetrieb im öffentlichen Verkehr erst in 15 Jahren zu rechnen.

Gesamtfazit und Diskussion

Die Ergebnisse der Befragung zeichnen ein differenziertes Bild der Herausforderungen, das trotz deut-

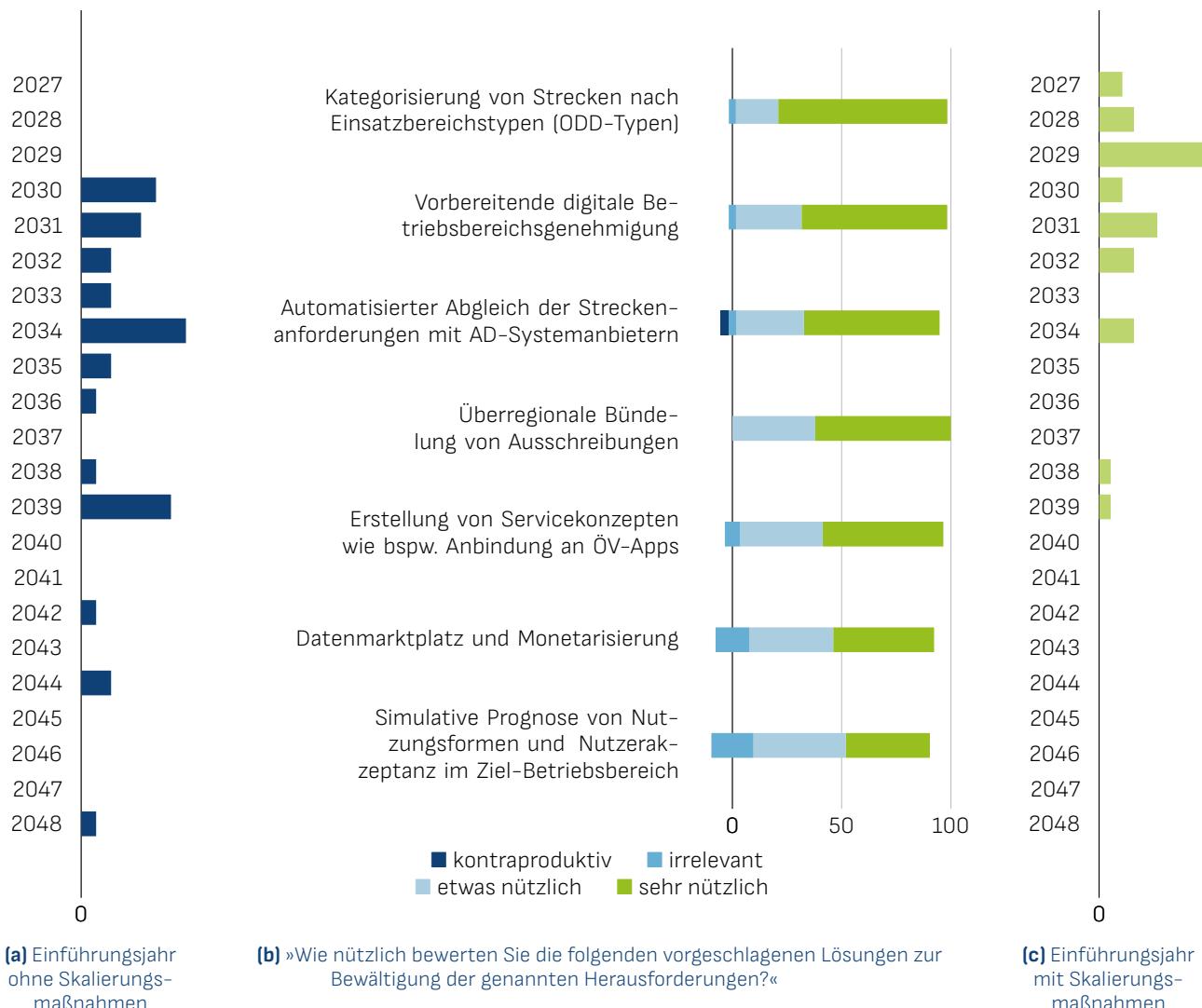


Abb. 13: Fragen zur Wirkung von vorgeschlagenen Maßnahmen. a), c): »Bis zu welchem Jahr erwarten Sie die überregionale Einführung von insgesamt mindestens 10.000 AF-Systemen im ÖPNV ohne und mit entsprechenden Maßnahmen, um die Skalierung zu unterstützen?« b): Bewertung der Nützlichkeit der Maßnahmen.

licher Unterschiede im Detail auch sehr große und systematische Gemeinsamkeiten offenbart.

Entgegen der Erwartungen zeigt sich, dass die große Mehrheit der Befragten inzwischen eine grundsätzlich offene Haltung der Menschen gegenüber automatisiertem Fahren erwartet, wobei gleichzeitig in vielen Rückmeldungen betont wird, dass die tatsächliche Akzeptanz in der Praxis durch konkrete technische und betriebliche Lösungen erworben werden muss.

Große Herausforderungen werden insbesondere in den Unsicherheiten zu betrieblichen Aspekten, technischer Aufsicht und Sonderfällen gesehen, sowie in Bezug auf technische Hürden und Zulassung, die zu deutlich erhöhten Aufwänden in der Einführung des automatisierten Fahrens liegen.

Mit Abstand am häufigsten als größte Herausforderung wurde jedoch die Technologiereife im automatisierten Fahren bewertet, darunter insbeson-

dere die Automatisierungstechnologie selbst, aber auch unterstützende Werkzeuge für Planung, Erprobung und Disposition. Wiederholt wurde angeführt, dass erst die Verfügbarkeit zulassungsfähiger Fahrzeuge viele der anderen Herausforderungen nach sich ziehen kann, und hier noch erhebliche Entwicklungsbedarfe gesehen werden.

Eine zur Diskussion gestellte Zukunftsvision, die diese Herausforderungen durch ein Ökosystem an verbnetzten Diensten für die digitale Planung, Abschätzung, Bewertung, bis hin zur Ausschreibung und Zulassung adressiert, wurde von der deutlichen Mehrheit der Befragten als nützlich oder sehr nützlich zur Lösung der Herausforderungen betrachtet.

Es unterstreicht den Charakter der Befragungsergebnisse, dass in Bezug auf die Einführung des automatisierten ÖPNV zwar einerseits deutliche Herausforderungen gesehen und klar benannt werden, aber andererseits kein unspezifischer Pessimismus



Aufgabenträger [müssen ihre] Kooperationsbereitsschaft zum betreffenden Beschaffungsziel verbindlich erklären und sich auf einen [vollständig gleichen] Ausschreibungstext verstündigen, um dann eine gebündelte Ausschreibung durchzuführen. [...] Die hohe gebündelte Nachfrage führt zu einem Angebot, [das] angesichts der Eröffnung dieses neuen Aktionsfelds in einen wirtschaftlich vertretbaren Innovationsrahmen bleibt.«

Rückmeldung eines Verkehrsverbunds



[In dem vorgestellten Zielbild] werden die Blockaden und zu lösenden Fragen [adressiert]. Genau das brauchen wir jetzt, nachdem die Technologie fast ausgereift und marktfähig ist (je nach Herstellerregion). Wir müssen in den F&E-Projekten mehr entwicklungsbegleitende Forschung praktizieren und keine Basisforschung. Das »entwickeln« der letzten 5% zum echten ÖPNV Angebot muss gefördert werden.«

Andreas Fehr
Senior Projektleiter für Autonomes Fahren
DB Regio Bus



Unsere Erfahrung hat gezeigt, dass gebündelte Beschaffungen trotz der überwiegenden Vorteile aufgrund unterschiedlicher Anforderungen durch [Verkehrsunternehmen] bereits auf Landesebene schwierig sein können. Auch wird der Nutzen durch die Beschaffenden selbst als eher gering eingeschätzt.«

Rückmeldung eines Verkehrsverbunds

herrscht. Die bestehenden Probleme werden überwiegend als lösbar eingeschätzt, wobei die Digitalisierung von Prozessen und Dienstleistungen als erheblicher Beschleuniger wahrgenommen wird.

Die Befragung kann mit einer Stichprobe von Expertinnen und Experten aus 29 Organisationen dabei lediglich eine eingeschränkte Abschätzung auf die Perspektive von Unternehmen und Organisationen im Sektor geben, überdeckt jedoch ein breites Spektrum an anwendungsnahen Akteuren und Aufgabenbereichen.

Die ergriffenen Maßnahmen in Deutschland und Europa in den kommenden Jahren werden den Blick darauf schärfen, inwieweit sich die genannten Perspektiven und Prognosen bewahrheiten, und mit darüber entscheiden, wann ein skalierter Regelbetrieb von automatisierten Fahrzeugen im öffentlichen Verkehr Wirklichkeit wird. ■

Literaturverweise

- Bundesministerium für Digitales und Verkehr (Dez. 2024). *Die Zukunft fährt autonom – Strategie der Bundesregierung für autonomes Fahren im Straßenverkehr*.
- Bundesrepublik Deutschland (2024). *Personenbeförderungsgesetz (PBefG)*.
- CDU, CSU und SPD (Apr. 2025). *Verantwortung für Deutschland: Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD*.
- Doll, Claus u. a. (Jan. 2025). *Fraunhofer-Positionspapier Leistungsfähige und nachhaltige Mobilitätswirtschaft*.
- Luchmann, Inga u. a. (Nov. 2024). *Autonomes Fahren im öffentlichen Verkehr – Ein Handbuch mit Vorschlägen für die Umsetzung in der kommunalen Praxis*.
- Roland Berger/Intraplan/Florenus im Auftrag des VDV (2021). *Verkehrswende gestalten – Gutachten über die Finanzierung von Leistungskosten der öffentlichen Mobilität*.
- SAE International (Sep. 2016). *J3016 – Surface Vehicle Recommended Practice – Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles*.
- UN/ECE (Juni 2015). *Regelung Nr. 107 – Einheitliche Bestimmungen für die Genehmigung von Fahrzeugen der Klassen M2 oder M3 hinsichtlich ihrer allgemeinen Konstruktionsmerkmale [2015/922]*.



KAMO

KARLSRUHE MOBILITY

HIGH PERFORMANCE CENTER / PROFILREGION



KAMO.ONE

Das **KAMO: Karlsruhe Mobility Leistungszentrum** (engl. High Performance Center) ist der Zusammenschluss der Karlsruher Institutionen für Forschung, Lehre und Transfer. Seit der Gründung 2016 – damals als »Leistungszentrum Profilregion Mobilitätssysteme Karlsruhe« gestartet – ist das Zentrum der zentrale Anlaufpunkt für interdisziplinäre Forschung und Entwicklung im Bereich Mobilität in Karlsruhe.

Seit sieben Jahren arbeiten in diesem Verbund die Karlsruher Forschungseinrichtungen Fraunhofer ICT, IOSB, ISI und IWM, das Karlsruher Institut für Technologie (KIT), das FZI Forschungszentrum Informatik und die Hochschule Karlsruhe (HKA) an der Mobilität von morgen, und unterstützen regionale, nationale und internationale Partner aus Wirtschaft, Forschung und öffentlicher Hand dabei, neue Ideen Wirklichkeit werden zu lassen.

TOGETHER, WE TAKE YOUR IDEAS FURTHER!

Fraunhofer
ICT

Fraunhofer
ISI

Fraunhofer
IOSB

Fraunhofer
IWM

KIT
Karlsruher Institut für Technologie

FZI

Hochschule Karlsruhe
University of
Applied Sciences

HKA