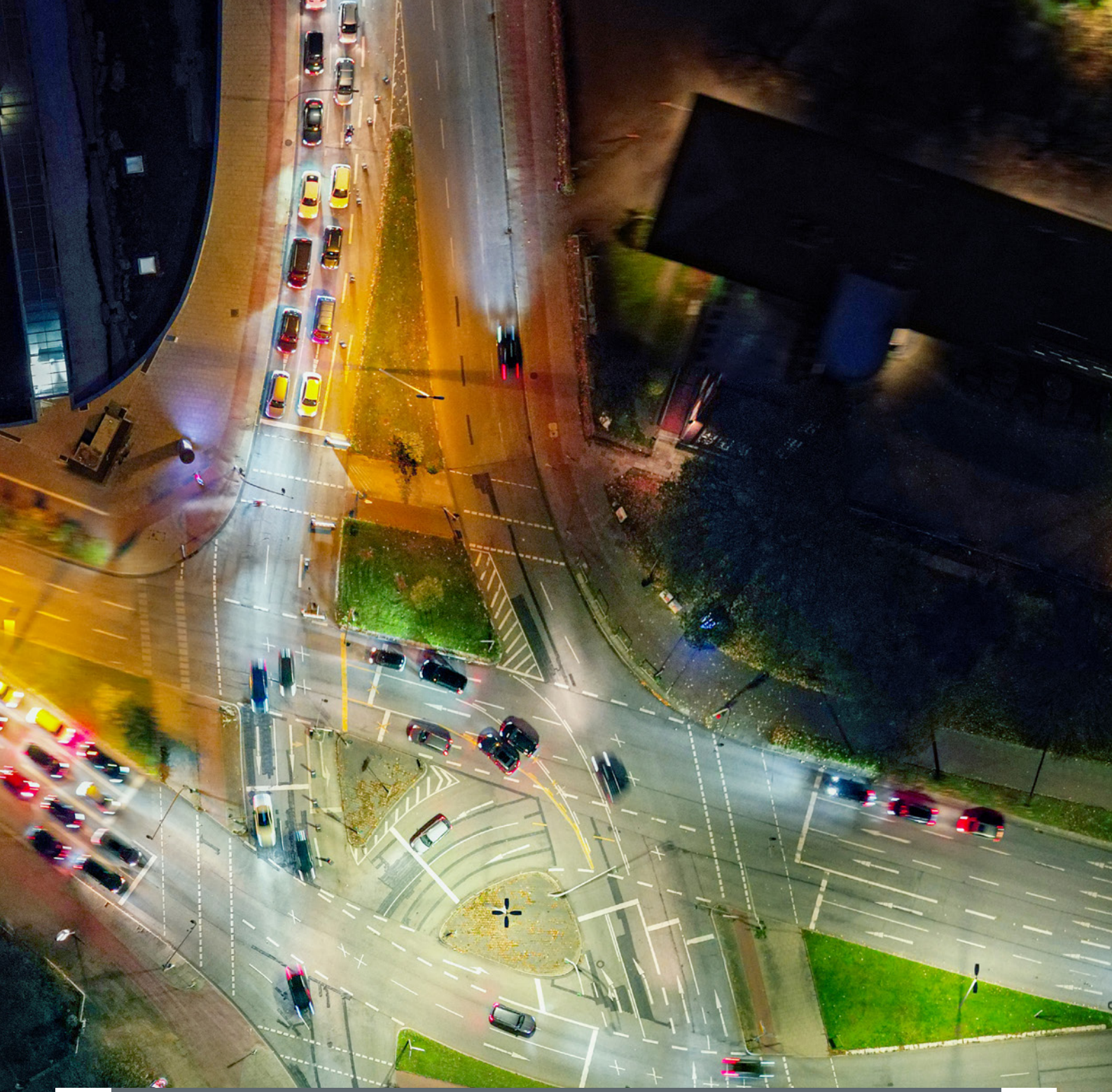

Autonomes Fahren im öffentlichen Linienverkehr

Juni 2025

VDV Die Verkehrsunternehmen | HOCHBAHN

Inhalt

Auf einen Blick 3

1. Zielsetzung 4

2. Analyse zum autonomen Fahren 5

   2.1 Kategorien fahrerloser Fahrzeuge 6

   2.2 Aktuelle Erprobungsprojekte 7

   2.3 Erwartete Zeitleiste für einen regelhaften Einsatz im ÖPNV 8

   2.4 Wirtschaftlichkeit fahrerloser Fahrzeuge im ÖPNV 9

3. Nächste Schritte zur Einführung autonomer Flotten im ÖPNV 12

4. Voraussetzungen für die Skalierung 14

Auf einen Blick

Das autonome Fahren eröffnet grundlegend neue Möglichkeiten, um den öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) flexibler und attraktiver zu gestalten – und zugleich dessen Wirtschaftlichkeit zu verbessern. Besonders deutlich zeigen sich die Vorteile des autonomen Fahrens im Bereich der Bus-Linienverkehre. Deren Automatisierung wird perspektivisch deutliche Kostensenkungen und Effizienzsteigerungen gegenüber dem heutigen, fahrergeführten Betrieb ermöglichen. Dadurch entsteht eine Chance für Städte und Kommunen, das öffentliche Verkehrsangebot ergebnisneutral auszuweiten – d. h. den ÖPNV-Modalanteil zu erhöhen, ohne die laufenden Kosten des ÖPNV zu erhöhen.

Damit autonome Fahrzeuge zeitnah im Linienverkehr eingesetzt werde können, ist ein koordiniertes Handeln verschiedener Akteure erforderlich:

→ Industrie

- Barrierefreie, fahrerlose Roboshuttles (5 m) und Robomidibusse (8 m) sollten möglichst kurzfristig in die Serienproduktion gebracht werden.
- Robobusse in der Größe üblicher Stadtbusse (12 m) sollten zeitnah, spätestens jedoch in einem Zeitraum von 5 bis 7 Jahren folgen.
- Von Seiten der deutschen und europäischen Industrie ist ein höheres Engagement erforderlich, um für den ÖPNV fahrerlose Systeme bereitzustellen, die gegen führende internationale Wettbewerber bestehen können.

→ Politik

- Um den Markthochlauf zu stimulieren, ist eine Anschubförderung zur Beschaffung und zum Betrieb entsprechender Fahrzeuge und Softwaresysteme notwendig.
- Die Förderung sollte sich auf Modellregionen beziehen. Eine Zersplitterung in isolierte Einzelprojekte sollte vermieden werden.
- Die Praxistauglichkeit der Regulierung sollte weiter verbessert werden, u. a. im Hinblick auf die Betriebserlaubnis- und Betriebsbereichsgenehmigungsverfahren.
- Für den Einsatz von autonomen Fahrzeugen im ÖPNV und insbesondere von Bussen muss der rechtliche Rahmen weiter angepasst werden (z. B. Personenbeförderung mit Erprobungsgenehmigung, Fahrzeugbreite, Überstreichen der Gegenfahrbahn).

→ Verkehrsunternehmen

- Verkehrsunternehmen sollten ihre Produktanforderungen, Prozesse, Systeme und Metriken zur Qualitätssteuerung gemeinsam erarbeiten und abstimmen, um auf Basis branchenweiter Standards eine industrielle Skalierung in Deutschland zu ermöglichen.
- Verkehrsunternehmen sollten sich frühzeitig darauf vorbereiten, im Bereich des fahrerlosen Fahrens auf neue Weise regional und überregional zu kooperieren.
- Die Auswirkungen auf die Belegschaft müssen im Rahmen der betrieblichen Mitbestimmung frühzeitig erörtert und in den Fokus strategischer Planungen gerückt werden.

→ Zusammenarbeit auf europäischer Ebene

- Eine enge Zusammenarbeit europäischer Städte und Verkehrsunternehmen im Rahmen des VDV und der UITP soll einen kontinuierlichen Wissenstransfer und Erfahrungsaustausch sicherstellen.
- Das Ziel ist eine klare industriepolitische Perspektive für die flächendeckende Skalierung marktreifer Lösungen im europäischen ÖPNV.
- Autonome Mobilität im ÖPNV ist kein vages Zukunftsversprechen, sondern eine konkrete Chance. Entscheidend ist: Wir müssen jetzt handeln – gemeinsam, koordiniert und strategisch.

1. Zielsetzung

Der Verkehrssektor steht vor einer tiefgreifenden Transformation. Fahrerlose Fahrzeuge – und damit fahrerlose Mobilitätsdienstleistungen – werden in absehbarer Zukunft Metropolen und ländliche Räume erschließen. Verkehrsunternehmen stehen dadurch vor der Herausforderung, ihre Markt- und Erfolgsbedingungen, aber auch die Prozesse ihrer Leistungserbringung grundlegend neu zu durchdenken.

In „Die Zukunft fährt autonom“ (BMDV 2024), beschreibt das Bundesverkehrsministerium die Trendwende in Richtung einer fahrerlosen Mobilität und formuliert das Ziel, Deutschland als Innovationsstandort für autonomes Fahren zu stärken. Besonders betont wird der Anspruch, den geschaffenen Rechtsrahmen praktisch umzusetzen, indem das vollautomatisierte Fahren (SAE-Level 4) deutschlandweit vom heutigen Erprobungs- in den Regelbetrieb überführt wird. Dies gelte gerade auch im Bereich des öffentlichen Personennahverkehrs. Der nationale Branchenverband deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) begrüßt im kürzlich veröffentlichten Positionspapier „Der ÖPNV der Zukunft fährt autonom“ (VDV 2025) die Strategie des BMDV und fordert eine politische Fokussierung von Förderprogrammen auf das fahrerlose Fahren im ÖPNV.

Unbestritten spielt der ÖPNV in urbanen Räumen wie z. B. der Metropolregion Hamburg eine zentrale Rolle bei der Umsetzung der Mobilitätswende (verstanden als nachhaltiger, effizienter und zugleich attraktiver Verkehr der Zukunft). Das politische Ziel eines ausgebauten, komfortablen und CO_2-neutralen Verkehrsangebotes steht allerdings in einem zunehmenden Spannungsverhältnis zu der finanziellen Realität der öffentlichen Haushalte. Die Hamburger Hochbahn AG (HOCHBAHN) hat sich – ebenso wie viele andere Nahverkehrsunternehmen in Deutschland – zum Ziel gesetzt, ihre Fahrgastzahlen trotz begrenzter finanzieller Spielräume bis 2035 deutlich zu steigern. Dazu muss die Wirtschaftlichkeit und Effizienz des Betriebs weiter erhöht werden. Mit dem konventionellen Busverkehr allein ist das angestrebte Fahrgastwachstum wirtschaftlich nicht umsetzbar.

Ob es tatsächlich gelingt, die Wirtschaftlichkeit und Verfügbarkeit öffentlicher Mobilitätsangebote mithilfe des fahrerlosen Fahrens zu verbessern, hängt von verschiedenen Faktoren ab – darunter der Marktverfügbarkeit von Fahrzeugen, die im Hinblick auf Fahrgastkapazität und Barrierefreiheit für den Einsatz im ÖPNV geeignet sind, dem Reifegrad und der Genehmigungsfähigkeit der Selbstfahrsysteme, der öffentlichen Akzeptanz und der sich einstellenden Kostenstruktur des fahrerlosen Betriebs. Diese Aspekte werden in den folgenden Kapiteln näher beleuchtet. Es soll gezeigt werden, dass fahrerloses Fahren voraussichtlich schon in wenigen Jahren zu einem zentralen Hebel für die Mobilitätswende und der ÖPNV zum zentralen Anwendungsfall für diese Zukunftstechnologie wird. Aufgrund hoher Fahrgastzahlen wird die mit Abstand wichtigste Bedienform nach Auffassung der HOCHBAHN der fahrerlose Linienverkehr sein.

Gleichzeitig möchte die HOCHBAHN dem Wunsch des VDV entsprechend ein konkretes Umsetzungsszenario aus Sicht eines großen ÖPNV-Anbieters entwerfen. Dies soll andere Verkehrsunternehmen inspirieren, die verkehrlichen und wirtschaftlichen Potenziale zu bewerten und ihrerseits Szenarien für einen Hochlauf abzuleiten. Im Ergebnis soll eine gemeinsame Marktperspektive für Politik und Industrie im europäischen Raum entstehen.

[1] BMDV-Strategie | Die Zukunft fährt autonom: https://www.bmv.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/die-zukunft-faehrt-autonom.pdf
[2] VDV-Positionspapier | Der ÖPNV der Zukunft fährt autonom: https://www.vdv.de/positionensuche.aspx

2. Analyse zum autonomen Fahren

Die HOCHBAHN erprobt derzeit gemeinsam mit Partnern im Rahmen des vom BMDV geförderten Projekts ALIKE ein autonomes On-Demand-Angebot in Hamburg. Das Projekt wird Ende 2026 abgeschlossen. Parallel zum ALIKE-Projekt hat die HOCHBAHN ein zwölfmonatiges Analyse-Projekt durchgeführt, um die sachlichen Entscheidungsgrundlagen für einen möglichen Einsatz fahrerloser Fahrzeuge im ÖPNV-Linienverkehr zu erarbeiten.

Im Fokus dieses Projektes standen die Fragen:

- Welche Bauformen von fahrerlosen Fahrzeugen befinden sich aktuell in Entwicklung (z. B. Pkw, „People Mover“ bzw. „Shuttle“, Bus)?
- Welche spezifisch für den ÖPNV relevanten Leistungsmerkmale haben die Fahrzeuge, z. B. Fahrgastkapazität, Barrierefreiheit, Lebensdauer, Reichweite, Einsatzbedingungen?
- Welchen technischen Reifegrad haben die Fahrzeuge sowie die für ihren Betrieb erforderlichen Selbstfahr- und sonstigen Softwaresysteme?
- Wann ist mit einer Betriebserlaubnis und Serienproduktion zu rechnen?
- Welche Hersteller sind bereits in der Lage, auf Ausschreibungen von Verkehrsunternehmen verbindliche Angebote abzugeben?
- Welche Kostenstruktur und Wirtschaftlichkeit, inklusive aller direkten und indirekten Kosten, ist für den fahrerlosen Flottenbetrieb zu erwarten? Sind Kostenvorteile gegenüber dem heutigen, fahrergeführten Betrieb tatsächlich realistisch?

Im Rahmen der Untersuchung wurden externe Studien ausgewertet, Interviews mit relevanten Herstellern geführt und vertiefende Workshops, teilweise in Kombination mit Vor-Ort-Besuchen und Probefahrten, durchgeführt. Zudem fand ein Austausch mit nationalen und europäischen ÖPNV-Partnern (darunter Norwegen, Niederlande, Schweiz, Österreich) statt, um aktuelle Branchenerfahrungen und Entwicklungen zu berücksichtigen. Auf Basis dieser Erkenntnisse wird im Folgenden zunächst eine Einschätzung der aktuellen Marktsituation gegeben.

Da sich die Anbieterlandschaft in den kommenden Jahren voraussichtlich noch weiterentwickeln wird, ist diese Einschätzung lediglich als Momentaufnahme zu verstehen. Angesichts hoher Anfangsinvestitionen, langer Entwicklungszeiträume und schwer kalkulierbarer Absatzpotenziale kam es in den vergangenen Jahren sowohl bei Fahrzeug- als auch bei Software-Herstellern zu Fusionen und Übernahmen, teilweise auch zum Rückzug relevanter Unternehmen sowie eingestellten oder unklar positionierten Projekten – ein Trend, der sich vermutlich noch fortsetzen wird. Andererseits kann das Bonmot der Unternehmensberatung Berylls: „It doesn’t matter when you ask the question – the breakthrough for autonomous driving (AD) is always five years away“ (Berylls 2023) inzwischen als klar falsifiziert gelten. Amerikanische und chinesische Unternehmen wie z. B. Waymo, Baidu Apollo oder WeRide befördern schon heute Millionen von Fahrgästen in fahrerlosen Fahrzeugen – in anspruchsvollen innerstädtischen Verkehrssituationen und ohne Sicherheitsfahrer*innen, wenn auch im Rahmen weniger strikt regulierter Märkte als denen Europas.

Vor dem Hintergrund großer Fortschritte im Bereich der autonomen Fahrsysteme – inkl. Sensorik, Umfelderkennung, Prädiktion, Manöverplanung und Fahrzeugsteuerung – ist die entscheidende Frage heute nicht mehr, ob fahrerloses Fahren kommt, sondern wer im Wettbewerb die Nase vorn hat und fahrerlose Fahrzeuge zur Marktreife führt, die im ÖPNV sinnvoll einsetzbar sind.

[3] Autonome On-Demand-Shuttles: https://www.hochbahn.de/autonom
[4] https://www.berylls.com/autonomous-driving-disillusionment-or-the-calm-before-the-storm/

2.1 Kategorien fahrerloser Fahrzeuge

Die HOCHBAHN unterteilt die in Entstehung befindlichen fahrerlosen Fahrzeugkonzepte unterschiedlicher Hersteller grundsätzlich in vier Kategorien (Bauformen) (Abbildung 1):

- **Robotaxi** (fahrerlose Pkw)
- **Roboshuttle** (fahrerlose Kleinbusse für ca. 10 Fahrgäste)
- **Robomidibus** (fahrerlose mittelgroße Busse für ca. 30 – 40 Fahrgäste)
- **Robobus** (fahrerlose Stadtbusse)

Auf globaler Ebene liegt der Fokus der Entwicklungsanstrengungen klar auf der Kategorie der Robotaxis. Ride-hailing-Anbieter wie z. B. Uber, Lyft oder Didi streben an und beginnen teilweise bereits, ihre Flotten entsprechend umzustellen. Für den öffentlichen Verkehr können Robotaxi-Fahrzeuge eine gewisse Rolle spielen, um ergänzende On-Demand-Angebote, z. B. zur Überbrückung der „letzten Meile“ in weniger dicht besiedelten Gebieten, zu schaffen. Allerdings ist diese Fahrzeugkategorie oft nicht barrierefrei. Auch bleibt abzuwarten, welches Betätigungsfeld für Verkehrsunternehmen im Bereich der On-Demand-Verkehre verbleibt, wenn fahrerlose Robotaxi-Angebote im Gelegenheitsverkehr schrittweise flächendeckend und preisgünstig verfügbar werden. Damit Robotaxi-Dienste nicht zu induzierten Verkehren führen, sollten in Deutschland in den ÖPNV integrierte Linien- und Linienbedarfsverkehre für den städtischen und ländlichen Raum im Mittelpunkt stehen.

Fahrzeugtypen

Fahrzeugtyp	Robotaxi	Roboshuttle	Robomidibus	Robobus
Fahrzeug-beispiel	Pony.ai/Toyota	HOLON	Karsan/ADASTEC	MAN
ca. Länge	**4 – 5 m**	**5 m**	**8 m**	**12 m**
ca. Fahrgäste	**4**	**10+**	**30+**	**70+**
Beispielhafte Hersteller	*Volkswagen Nutzfahrzeuge, NIO* *Für Linienverkehr zu klein & nicht barrierefrei – daher nicht betrachtet*	*HOLON, Schaeffler, Renault/WeRide*	*Karsan/ADASTEC, eVersum*	*MAN, IVECO, Daimler*

Hinweis: Eine Verfügbarkeit von fahrerlosen Gelenk- und Großraum-Robobussen ist aktuell nicht absehbar – daher werden diese nachfolgend nicht betrachtet

Abbildung 1: Kategorisierung von fahrerlosen Fahrzeugen (eigene Darstellung; Bildquellen: Pony.ai, HOLON, ADASTEC, MAN)

Auf der anderen Seite des Spektrums befindet sich die für Verkehrsunternehmen hoch relevante Kategorie des Robobusses. Anders als einige chinesische Unternehmen, zeigen die etablierten deutschen und europäische Hersteller bisher noch keine gezielten Anstrengungen, dieses Fahrzeug zur Marktreife zu führen. Der Fokus der einheimischen Industrie scheint angesichts des größeren Marktvolumens zunächst auf automatisierten Lkw zu liegen, ggf. in der Absicht eines späteren Technologie-Transfers in Richtung Robobus. Die Positionierung gerade auch der deutschen Unternehmen im zukünftigen Robobus-Markt bleibt – trotz erster Forschungsprojekte wie BeIntelli in Berlin und MINGA in München – weitgehend unklar. Für chinesische Unternehmen erweist sich wiederum der europäische Markteintritt als herausfordernd, z. B. im Hinblick auf Genehmigungsverfahren, Händlernetzwerke und politische Bedenken, im Bereich kritischer Infrastrukturen auf chinesische Partner zu setzen. Anders als in ihrem Heimatmarkt China, werden sie daher in Europa noch wenig sichtbar sein.

Einen für Verkehrsunternehmen interessanten Kompromiss zwischen Marktverfügbarkeit und Größe bieten die Kategorien Roboshuttle und Robomidibus. Vorangetrieben von teils jungen und innovativen Unternehmen, sind diese Bauformen spezifisch auf Anforderungen des ÖPNV ausgerichtet. Sie sind barrierefrei gestaltet und bieten zumindest für manche Buslinien, z. B. in Stadtrandbereichen oder ländlichen Räumen ohne ausgeprägte Schülerspitze, eine ausreichende Fahrgastkapazität.

2.2 Aktuelle Erprobungsprojekte

Nicht nur für die Hersteller fahrerloser Fahrzeuge, sondern auch für die Verkehrsunternehmen als zukünftige Flottenbetreiber sind Erprobungsprojekte unverzichtbar, um technische Systeme, betriebliche Prozesse, Mitarbeiter*innen, und nicht zuletzt Fahrgäste und die allgemeine Öffentlichkeit auf den Regelbetrieb vorzubereiten.

Der regulatorische Rahmen für Erprobungsprojekte in Deutschland ist mit der Änderung des Straßenverkehrsgesetzes und der Einführung der Verordnung zur Genehmigung und zum Betrieb von Kraftfahrzeugen mit autonomer Fahrfunktion in festgelegten Betriebsbereichen (Autonome-Fahrzeuge-Genehmigungs-und-Betriebs-Verordnung, AFGBV, 2021) fortschrittlich und zugleich sicherheitsorientiert ausgestaltet. Die Fähigkeiten und Grenzen des Fahrsystems werden im Rahmen von Erprobungsgenehmigungen zunächst mit kleinen Flotten und Sicherheitsfahrer*innen im Fahrzeug getestet. Alle heutigen Projekte zum automatisierten Fahren in Deutschland sind derzeit entsprechend genehmigt. Erst wenn der Nachweis erbracht ist, dass kein menschliches Übersteuern des Fahrsystems mehr erforderlich ist, können die Sicherheitsfahrer*innen entfallen und eine Betriebserlaubnis als fahrerloses Fahrzeug erteilt werden. Dieser Schritt steht in Deutschland noch aus, wird aber voraussichtlich in den kommenden 2 bis 3 Jahren geschafft sein.

Relevante Erprobungsprojekte unter Beteiligung von Verkehrsunternehmen finden derzeit zum Beispiel in Hamburg, Hannover, München, Leipzig und Darmstadt/Offenbach, aber auch vielfach im europäischen Ausland statt (z. B. Oslo, Rotterdam, Stavanger, Schweiz, Luxemburg). Die Schaffung von Synergien und Kooperationsnetzwerken zwischen den Projekten ist für den gemeinsamen Erfolg essenziell. Die Netzwerke sollten nicht nur die Verkehrsbetriebe selbst, sondern auch Akteure aus ÖPNV, Ländern, Kommunen, Politik und Wissenschaft umfassen (VDV 2025).

Im Hinblick auf die finanzielle Förderung von Erprobungsprojekten engagiert sich die öffentliche Hand bisher überwiegend im Rahmen kleiner, zeitlich begrenzter Vorhaben mit wenigen Fahrzeugen. Diese Projekte ermöglichen wichtige erste Betriebserfahrungen und Erkenntnisse, u. a. im Hinblick auf die Weiterentwicklung der Fahrzeuge auf Basis von Rückmeldungen von Testkund*innen und Betreibern. Zugleich zeichnet sich ab, dass die erreichbare Lernkurve der vielen kleinen Projekte begrenzt ist. In einem nächsten Schritt wird in den kommenden Jahren eine gezielte Förderung von Modellregionen erforderlich sein, um den Markthochlauf zu stimulieren und fahrerlose Flotten in den ÖPNV-Realbetrieb zu bringen.

2.3 Erwartete Zeitleiste für einen regelhaften Einsatz im ÖPNV

Auf Basis des durchgeführten Analyseprojektes geht die HOCHBAHN davon aus, dass erste reguläre Genehmigungen für autonome Fahrzeuge in Deutschland Ende 2026 / Anfang 2027 erteilt werden. Diese Genehmigungen werden sich voraussichtlich auf Pkw, d. h. auf die Fahrzeugkategorie Robotaxi, beziehen. Insbesondere scheint sich eine Betriebserlaubnis für das von Volkswagen Nutzfahrzeuge und MOIA entwickelte Fahrzeug ID.Buzz AD abzuzeichnen, welches aktuell bereits u. a. in Hamburg erprobt wird. Die Betriebserlaubnis für die für Verkehrsunternehmen wichtigen Fahrzeugkategorien Roboshuttle und Robomidibus wird voraussichtlich mit einer Verzögerung von ca. einem Jahr folgen. Die HOCHBAHN erwartet, dass mindestens die Betriebserlaubnisse für den autonomen Karsan e-ATAK und für den HOLON urban, möglicherweise für weitere Fahrzeuge erteilt werden.

Fahrerlose Fahrzeuge im Regelbetrieb

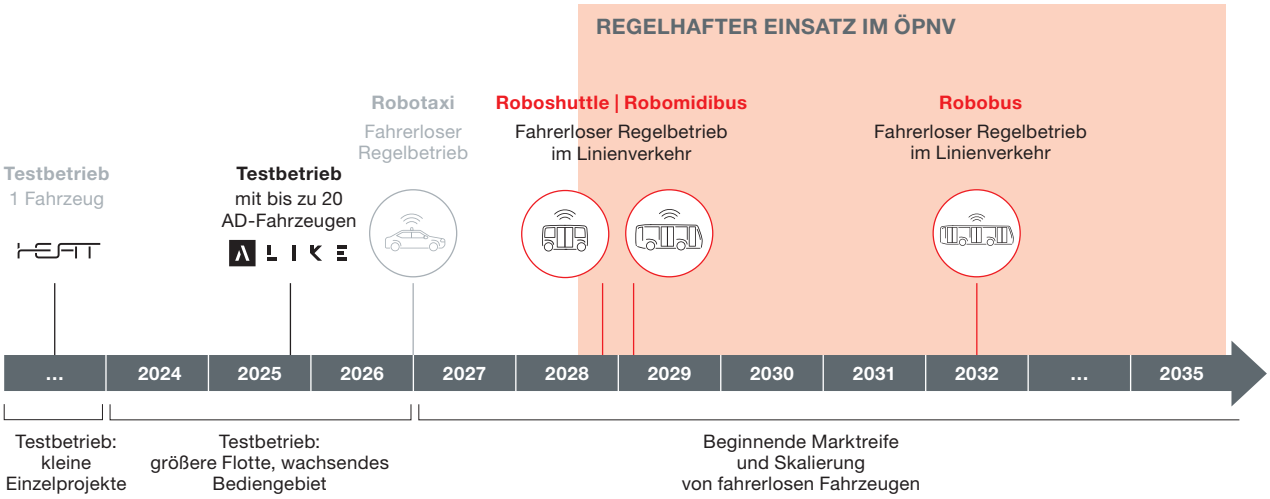

Abbildung 2: Zeitstrahl mit Beginn des regelhaften Einsatzes von fahrerlosen Fahrzeugen im ÖPNV (eigene Darstellung)

Der Flottenbetrieb mit Fahrgästen kann allerdings erst aufgenommen werden, nachdem das durchführende Verkehrsunternehmen, aufbauend auf der vom Kraftfahrtbundesamt erteilten Betriebserlaubnis, in einem zweiten Schritt eine Betriebsbereichsgenehmigung durch die zuständige Landesbehörde erwirkt hat. Diese Genehmigung bezieht sich u. a. auf das angestrebte Streckennetz, auf die Einrichtung von betrieblichen Sicherheitsprozeduren, das Zusammenwirken von Fahrzeug und Betriebsführungssystem (Leitstelle, Technische Aufsicht) sowie die Qualifikation und persönliche Eignung der eingesetzten Mitarbeiter*innen. Auch dieser zweite Schritt, für den noch keine behördliche und betriebliche Übung vorhanden ist, wird Zeit benötigen. Zudem brauchen die Hersteller einen hinreichenden Vorlauf, um ihre Fertigungskapazitäten aufzubauen sowie Wartungs-, Reparatur- und Ersatzteilprozesse zu etablieren.

Alles in allem geht die HOCHBAHN davon aus, dass erste serienproduzierte, fahrerlose Roboshuttles und Robomidibusse ab 2028/2029 regelhaft im ÖPNV-Linienverkehr eingesetzt werden können (Abbildung 2). Dies umfasst die vollständige Erreichung von SAE-Level 4 in Deutschland. Für Robobusse erwartet die HOCHBAHN einen regelhaften Einsatz nicht vor 2032.

Reifegrad und Verfügbarkeit von Fahrzeugen

- Roboshuttles und Robomidibusse stehen voraussichtlich **ab ca. 2028/29 typgenehmigt** für einen fahrerlosen ÖPNV-Regelbetrieb zur Verfügung.
- **Robobusse (12m) sind erst ab ca. 2032** für den Einsatz im Regelbetrieb am Markt zu erwarten.
- Es ist anzunehmen, dass in den 2030er Jahren noch **keine Gelenk-Robobusse und Großraum-Robobusse** verfügbar sein werden.

2.4 Wirtschaftlichkeit fahrerloser Fahrzeuge im ÖPNV

In Zusammenarbeit mit einer namhaften Unternehmensberatung hat die HOCHBAHN Wirtschaftlichkeitsrechnungen für den Einsatz von fahrerlosen Fahrzeugen im ÖPNV-Linienverkehr erarbeitet und diese dem konventionellen Busbetrieb gegenübergestellt. Aufbauend auf der erwarteten Zeitleiste für die Einsatzreife autonomer Fahrzeuge (Abbildung 2), wurden drei beispielhafte Anwendungsszenarien betrachtet:

- **Szenario 1:** Einsatz von Roboshuttles ab 2029
- **Szenario 2:** Einsatz von Roboshuttles und Robomidibussen ab 2029
- **Szenario 3:** Einsatz von Robobussen ab 2032

Bei allen Anwendungsszenarien wurde zunächst untersucht, in welchem Umfang konventionelle E-Solobusse sinnvoll durch fahrerlose Fahrzeuge ersetzt werden können – im Falle von Roboshuttles und Robomidibussen z. B. auf schwächer ausgelasteten Linien in Randbereichen. In dem Maße, wie durch diesen ersten Schritt rechnerisch die Bus-Betriebskosten reduziert werden konnten, wurde in einem zweiten Schritt eine bedarfsgerechte Erweiterung des Angebotes angenommen, z. B. in Form von zusätzlichen fahrerlosen Linien oder Quartierbussen. Die Analyse wurde für das Stadtgebiet Hamburg auf Basis des heutigen Bus-Liniennetzes durchgeführt.

Um abzuschätzen, welche Kosten für einen zukünftigen fahrerlosen Busbetrieb zu erwarten sind, wurden Marktrecherchen, Expert*innengespräche, Herstellerangaben zu den Investitions- und Betriebskosten der jeweiligen Fahrzeugkategorien sowie interne Daten der HOCHBAHN zu Personalkosten, Wartung und Betriebshofinfrastruktur herangezogen. Sämtliche heute bekannte Einflussfaktoren und Kostenarten – z. B. Abschreibungen, Finanzierungskosten, Versicherung, Lizenzgebühren, Energie, Betriebspersonal, Reinigung, Reparaturen, Technische Aufsicht durch die Leitstelle etc. – wurden möglichst vollständig berücksichtigt, um letztlich die **Vollkosten pro Fahrzeug-km (TCO/km)** abzuleiten. Dabei wurden zunächst keine Förderungen durch Landes- oder Bundesmittel unterstellt (obwohl diese nach Einschätzung der HOCHBAHN als Anschubfinanzierung unverzichtbar sein werden). Die Kategorie der Robotaxis wurde nicht berücksichtigt, da sie aufgrund der geringen Fahrgastkapazität und der eingeschränkten Barrierefreiheit nur eingeschränkt für den Linienverkehr geeignet ist.

Da die Vollkosten pro Fahrzeug-km (TCO/km) und die angenommene Flottengröße sich wechselseitig beeinflussen – beispielsweise führen geringere Total Cost of Ownership (TCO) verkehrsplanerisch zu einer größeren Flotte und eine größere Flotte führt durch Skaleneffekte wiederum zu geringeren TCO – wurden beide Faktoren durch ein interdisziplinäres Team des Finanzbereiches und der Angebotsplanung der HOCHBAHN iterativ angenähert. Im Ergebnis ergab sich eine Größenordnung von **500 fahrerlosen Fahrzeugen**, die in Hamburg bis zum Jahr 2035 sinnvoll einsetzbar erscheinen. Die folgenden Kostenabschätzungen beziehen sich daher auf diese Flottengröße.

HOCHBAHN AD-Business Case

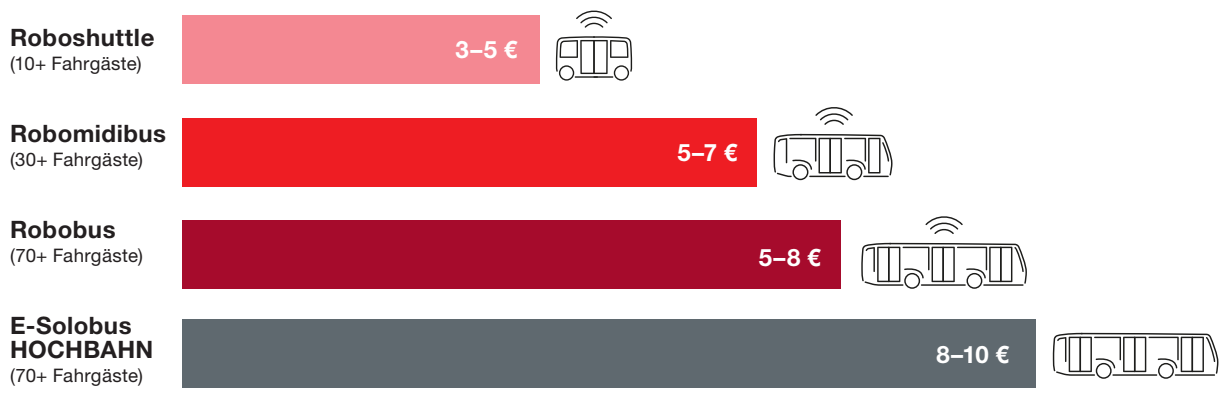

Abbildung 3: Gegenüberstellung der Fahrzeugkategorien anhand von Vollkosten pro Fahrzeug-km (Prognose bis 2035, Stand: April 2025)

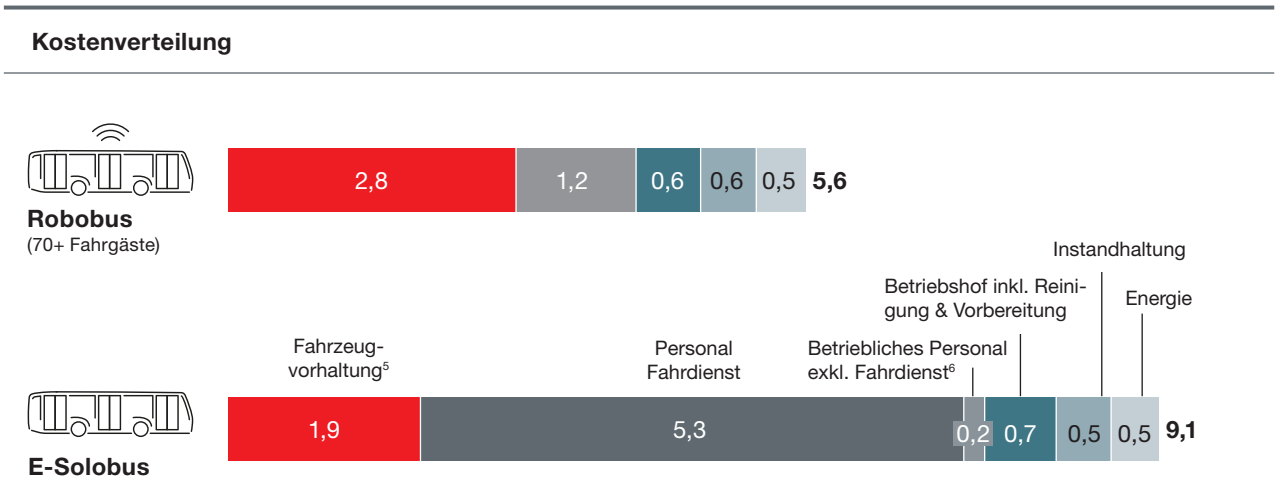

Abbildung 4: Gegenüberstellung von Robobus und E-Solobus anhand von Vollkosten pro Fahrzeug-km, in Prozent (Prognose bis 2035, Stand: April 2025)

Es ergeben sich folgende Erkenntnisse:

Die **Fahrzeug-Vollkosten (TCO/km) eines konventionellen, fahrergeführten E-Solobusses** – die in den letzten Jahren branchenweit bereits deutlich gestiegen sind – werden voraussichtlich **weiter steigen** und bis zum Jahr 2035 ca. 8–10 EUR/km erreichen (Abbildung 3).

Die **Fahrzeug-Vollkosten (TCO/km) von fahrerlosen Fahrzeugen** werden im Jahr 2035 voraussichtlich deutlich **unter** denen des **konventionellen E-Solobusses** liegen (Abbildung 3 und Abbildung 4).

Der Kostenvorteil fahrerloser Fahrzeuge gegenüber konventionellen E-Solobussen wird durch **technischen Fortschritt und Skalierungseffekte** perspektivisch **weiter zunehmen**. Hinzu kommen weitere Potenziale durch einen flexiblen und effizienten Fahrzeugeinsatz, die sich aus dem Entfall von Restriktionen in der Schichtplanung ergeben. Diese Potenziale sind in den Wirtschaftlichkeitsrechnungen der HOCHBAHN noch nicht berücksichtigt.

Kleinere fahrerlose Fahrzeuge sind, gemessen an den gefahrenen Fahrzeug-Kilometern, **günstiger als größere**. Wenn die jeweilige Linie ein geringes Fahrgastvolumen aufweist – **z. B. in Randzeiten oder im ländlichen Raum** – können gerade Roboshuttles ihren Kostenvorteil voll ausspielen. Angesichts ihrer begrenzten Fahrgastkapazität eignen sie sich jedoch weniger für höhere Fahrgastvolumen, da der Mehrbedarf an Fahrzeugen die geringeren Kosten pro Fahrzeug-km schnell überkompensiert.

Bei linienscharfer Betrachtung des Hamburger Busnetzes zeigen sich **zahlreiche Anwendungsfälle für Robomidibusse, bei denen eine Fahrgastkapazität von 30 bis 40 Personen ausreicht**, um einen konventionellen E-Solobus zu ersetzen und dabei einen Kostenvorteil von ca. 30 % zu realisieren. Solange noch keine fahrerlosen Robobusse am Markt verfügbar sind, bietet sich für Hamburg daher ein Fokus auf das o. g. Szenario 2 an. Dabei übersteigt die wirtschaftlich optimale Anzahl an Robomidibussen die Anzahl der Roboshuttles voraussichtlich deutlich.

[5] Abschreibungen, Genehmigungskosten Betriebsbereich, Software-Gebühren, Versicherungskosten, Zinsen
[6] Flottenmanagement, Planung (Operations), Betriebslenkung / Leitstelle inkl. Technische Aufsicht (Remote), Fahrgastraumüberwachung (Safety), Verkehrsüberwachung & Notfallmgmt. (Field), Kundendienst Autonomer Betrieb

Im Vergleich zu heutigen E-Solobussen werden die Betriebskosten fahrerloser Fahrzeuge nicht nur deutlich sinken, sondern sich auch strukturell verändern. Kapitalkosten werden eine größere, Personalkosten eine geringere Rolle spielen als heute. Neue Tätigkeitsprofile in der Betriebsvorbereitung, Systemüberwachung und Fahrgastbetreuung werden entstehen und sich in den Anfangsjahren als durchaus personalintensiv darstellen – unter anderem aufgrund strikter regulatorischer Vorgaben im Hinblick auf tägliche Abfahrtskontrollen und häufige Sicherheits- und Hauptuntersuchungen. Sie reichen aber insgesamt nicht an das Arbeitsvolumen des heutigen Fahrdienstes heran und werden mit zunehmender Reife und Allgegenwärtigkeit des autonomen Fahrens tendenziell abnehmen.

Zusammenfassend erwartet die HOCHBAHN im eingeschwungenen Zustand einer skalierten fahrerlosen Flotte für das Jahr 2035 einen ergebnisneutralen Betrieb gegenüber konventionellen, fahrergeführten E-Bussen. Sie geht davon aus, dass in vielen Fällen sogar Angebotsausweitungen im Rahmen der bestehenden Budgetplanungen möglich werden.

Wirtschaftlichkeit des fahrerlosen Betriebs

- Busbetrieb mit fahrerlosen Fahrzeugen ist unter Berücksichtigung von Investitionen und Betriebskosten noch **wirtschaftlicher als heute**.
- Geänderte **Personalkostenstruktur** ist wesentlicher Treiber für **Kostenvorteil** – trotz notwendigem Ressourcenaufbau bei Systemsteuerung und -überwachung.
- Über die Zeit ist ein **wachsender Kostenvorteil** des fahrerlosen Betriebes vor dem Hintergrund des technischen Fortschritts und zugleich ansteigender Kosten im manuellen Fahrbetrieb zu erwarten.

3. Nächste Schritte zur Einführung autonomer Flotten im ÖPNV

Das Analyseprojekt der HOCHBAHN zu Marktreife und Wirtschaftlichkeit von fahrerlosen Fahrzeugen zeigt, dass diese in voraussichtlich 3 bis 4 Jahren für den Regeleinsatz im ÖPNV-Linienverkehr verfügbar sein und langfristig einen im Vergleich zum fahrergeführten E-Bus kostengünstigeren, flexibleren und effizienteren Betrieb ermöglichen werden. Die HOCHBAHN erwartet daher, dass das fahrerlose Fahren – in einem skalierten und eingeschwungenen Zustand – Spielräume für Angebotsausweitungen schafft und einen Beitrag leisten kann, um trotz angespannter öffentlicher Haushalte den Modalanteil öffentlicher Verkehre zu erhöhen.

Auf dieser Basis setzt sich die HOCHBAHN das strategische Ziel, Hersteller bei der Entwicklung und Markteinführung von autonomen Fahrzeugen, die für den Einsatz im ÖPNV geeignet sind, aktiv zu begleiten und sowohl Roboshuttles als auch Robomidibusse möglichst frühzeitig betrieblich zu erproben. Sie möchte sich damit systematisch auf die Zukunft des fahrerlosen Busbetriebs vorbereiten sowie zugleich gemeinsam mit dem VDV ein Signal an die Industrie und Politik senden, im Sinne eines besseren und wirtschaftlicheren ÖPNV-Angebotes gemeinsam die Anstrengungen für die Umsetzung von fahrerlosen ÖPNV-Linienverkehren in Deutschland und Europa zu intensivieren.

Die HOCHBAHN und der VDV streben eine enge Vernetzung mit weiteren Verkehrsunternehmen an, um Wissen zu teilen, Aufwände zu reduzieren und branchenweit gemeinsame Standards zu etablieren. Das gemeinsame Ziel aller Verkehrsunternehmen muss es sein, eine Zersplitterung des entstehenden Marktes in jeweils isolierte lokale Einzelprojekte zu vermeiden. Stattdessen sollte durch ein abgestimmtes und partnerschaftliches Vorgehen die Komplexität für alle Beteiligten – darunter insbesondere auch Hersteller und Behörden – reduziert, und dadurch eine zügige und flächendeckende Einführung fahrerloser ÖPNV-Angebote ermöglicht werden.

Als konkreten nächsten Entwicklungsschritt strebt die HOCHBAHN an, im Zeitraum 2026 bis 2028 jeweils drei Roboshuttles und drei Robomidibusse von mindestens zwei unterschiedlichen Herstellern im öffentlichen Linienverkehr zu erproben („Erprobungsphase“ in Form von „Projekt 3plus3“, Abbildung 5). Anders als bei bisherigen Erprobungsprojekten in Deutschland sollen diese Fahrzeuge über eine reguläre Betriebserlaubnis und eine Betriebsbereichsgenehmigung verfügen, so dass diese im Projektverlauf ohne Sicherheitsfahrer*in betrieben und ohne weitere Voraussetzungen von der allgemeinen Öffentlichkeit genutzt werden können („open user group“). Die Fahrzeuge sollen auf Bestandslinien eingesetzt werden und den üblichen Qualitätsstandards des Hamburger Verkehrsverbundes entsprechen. Ziel der dreijährigen Erprobungsphase ist es, alle erforderlichen Fähigkeiten, Prozesse, Systeme und Erfahrungen aufzubauen, um ab 2028/29 für eine substanzielle Skalierung der fahrerlosen Flotte vorbereitet zu sein. Hierzu gehört ausdrücklich auch die intensive Auseinandersetzung mit den Rückmeldungen der Fahrgäste sowie die Erarbeitung personalpolitischer Konzepte für die langfristige Transition des Busbetriebs und deren frühzeitige Erörterung im Rahmen der betrieblichen Mitbestimmung.

Hochlauf der Fahrzeugflotte

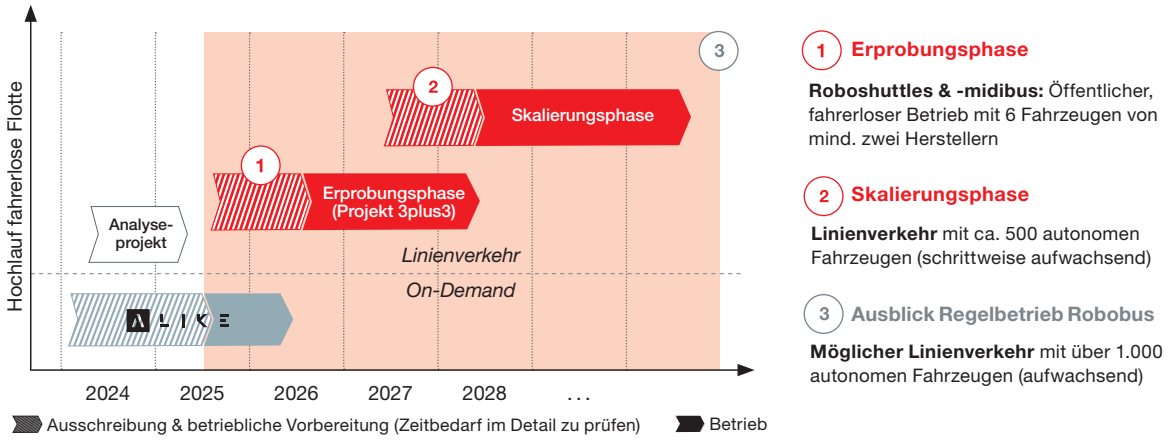

Abbildung 5: Phasen zur Einführung fahrerloser Fahrzeuge bei der HOCHBAHN (eigene Darstellung)

Die HOCHBAHN wird ihre Konzepte und Erkenntnisse, die sie im Zuge des Projekt "3plus3" gewinnen wird, dem VDV und anderen Verkehrsunternehmen zur Verfügung stellen, um zu einem branchenweiten, gemeinsamen Lernprozess beizutragen.

Den Übergang vom fahrerlosen Erprobungs- in den Regelbetrieb erwartet die HOCHBAHN für 2028/29 („Skalierungsphase", Abbildung 5). Nach heutiger Erkenntnislage können im Stadtgebiet Hamburg, unter Berücksichtigung aller Verkehrsunternehmen, in einem ersten Skalierungsschritt insgesamt 500 Roboshuttles und Robomidibusse verkehrlich sowie wirtschaftlich sinnvoll eingesetzt werden. Sobald ab ca. 2032 fahrerlose Robobusse in der Größe heutiger Stadtbusse zur Verfügung stehen, erwartet die HOCHBAHN, dass Ersatzbeschaffungen für konventionelle Busse, die das Ende ihrer Lebensdauer erreicht haben, schrittweise durch Robobusse erfolgen werden. Hierdurch steigt die erwartete Gesamtanzahl der Roboshuttles, Robomidibusse und Robobusse im Hamburger ÖPNV im Laufe der 2030er Jahre auf ca. 1.000 Fahrzeuge. Ausgenommen bleiben Gelenkbusse sowie Großraumbusse, für deren Automatisierung nach Kenntnis der HOCHBAHN keine Zeitleiste absehbar ist, sowie E-Solobusse, bei denen aus besonderen Gründen weiter auf manuelles Fahren gesetzt werden soll.

4. Voraussetzungen für die Skalierung

Damit die Einführung und Skalierung fahrerloser Fahrzeuge im ÖPNV gelingt, müssen bestimmte Rahmen- und Erfolgsbedingungen geschaffen werden. Politik, Behörden und Verkehrsunternehmen sind gefordert, an der Gestaltung dieser Bedingungen aktiv mitzuwirken.

→ Fahrzeugverfügbarkeit

Damit Hersteller zeitnah die Serienproduktion von fahrerlosen Fahrzeugen für den deutschen ÖPNV-Markt aufnehmen können, ist ein frühzeitiger, enger und kontinuierlicher Austausch zwischen Verkehrsunternehmen und Industrie erforderlich. Verkehrsunternehmen sollten sich nicht einseitig in die Rolle eines „Konsumenten“ begeben, der die Verfügbarkeit technisch ausgereifter fahrerloser Fahrzeuge lediglich abwartet, sondern die Rolle eines Innovationspartners einnehmen, der die Entwicklung und Erprobung aktiv begleitet. Gemeinsames, iteratives Lernen von Herstellern und Verkehrsunternehmen ist angesichts des disruptiven Charakters des fahrerlosen Fahrens und der sich daraus ableitenden Bandbreite technischer, rechtlicher, betrieblicher und personalstrategischer Fragen unverzichtbar.

Nicht optimal wäre eine Zersplitterung der Anstrengungen auf zu viele Kleinprojekte. Stattdessen sollte eine begrenzte Anzahl von größeren Projekten umgesetzt werden, die sowohl untereinander als auch mit Herstellern und der ÖPNV-Branche in engem Austausch stehen. Diese Projekte sollten über eine hinreichende Laufzeit und personelle Ausstattung verfügen, um grundlegende Anforderungen an Fahrzeuge und Betriebsführungssysteme, aber auch Planungs-, Betriebs- und Genehmigungsprozesse sowie Kennzahlensysteme zur Leistungs- und Qualitätssteuerung zu erarbeiten und als branchenweite Standards zu propagieren, von den alle Verkehrsunternehmen profitieren können. Diese Standardisierung erleichtert nicht nur die Produktentwicklung für Hersteller, sondern vermeidet ineffiziente Insellösungen und reduziert für alle Seiten die Komplexität, sodass letztlich auch die Beschaffungsprozesse vereinfacht und verkürzt werden.

→ Förderbedarf

Während das fahrerlose Fahren im skalierten und eingeschwungenen Zustand einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit des ÖPNV leisten kann, wird in der anstehenden Erprobungs- und Aufbauphase eine Anschubförderung erforderlich sein – insbesondere, solange sich noch Personal im Fahrzeug befindet. Die öffentliche Förderung sollte auf Modellregionen fokussiert werden, die eine hinreichende kritische Masse und Kontinuität sicherstellen können, um Wissen und Erfahrungen als Kristallisationspunkte für die gesamte ÖPNV-Branche zu bündeln. Sowohl aus verkehrspolitischen als auch aus industriepolitischen Gründen sollten Städte, Länder und Bund diese Modellregionen aktiv fördern und entsprechende Zuwendungen bereitstellen. Die HOCHBAHN regt an, dass die Förderung auf einen Zeitraum von 5 bis 7 Jahren ausgerichtet und am Rahmenwerk der bisherigen E-Bus-Förderung orientiert wird.

→ Rechtlicher Rahmen

Verkehrsunternehmen und VDV sollten auf Bundes- und EU-Ebene mit einer gemeinsamen Stimme auftreten, um bei der Umsetzung des fahrerlosen Fahrens für praxisnahe Lösungen zu werben und bürokratische Hürden zu minimieren. Wichtige Anliegen sind z. B. eine bundeslandübergreifende Vereinfachung, Standardisierung und Beschleunigung der Betriebsbereichsgenehmigungsverfahren, eine Vereinfachung (und optimalerweise Automatisierung) der täglichen Abfahrtskontrolle auf den Betriebshöfen und eine angemessene Flexibilisierung der qualifikatorischen Anforderungen für die Technische Aufsicht in Leitstellen.

→ Vorausschauende Personalstrategie

Das fahrerlose Fahren führt perspektivisch zu einer tiefgreifenden Transformation von Tätigkeitsprofilen, Arbeitsabläufen und Belegschaftsstrukturen. Neue Berufsbilder z. B. im Bereich der Überwachung und Betriebssteuerung müssen ausgestaltet, Anforderungen an die Qualifikationen definiert sowie Schulungskonzepte und mögliche Entwicklungspfade für bestehende Mitarbeitende entwickelt werden. Andere Tätigkeitsprofile, z. B. im heutigen Fahrdienst, entfallen. Damit dieser Wandel gelingt, müssen die Veränderungsprozesse frühzeitig strategisch vorbereitet und im gesamten Unternehmen aktiv begleitet werden.

Zentral ist eine vorausschauende Personalstrategie, die den Wandel aktiv gestaltet, die Belegschaft einbezieht und breite Akzeptanz bei den Mitarbeiter*innen, aber auch in Politik und Bevölkerung schafft.

→ Regionale und überregionale Zusammenarbeit

Je besser es der ÖPNV-Branche gelingt, bei der Umsetzung des fahrerlosen Fahrens von Anfang an auf Zusammenarbeit und gemeinsame Standards zu setzen, desto mehr öffnet sich die Tür für regionale und überregionale Kooperationsformen der Zukunft – und damit zu neuartigen Synergiepotenzialen. Denn anders als beim konventionellen Busbetrieb, in dessen Mittelpunkt das Fahrpersonal steht, bietet ein fahrerloser Fahrbetrieb die Möglichkeit, Teile der Wert-schöpfungskette räumlich auszugliedern und mit anderen Verkehrsunternehmen zusammen-zuführen. Naheliegende Beispiele sind Tätigkeiten im Bereich der Fernüberwachung und Kontrolle, aber auch im Bereich der Kundeninformations- und Buchungssysteme oder der Datenbereitstellung, Qualitätsanalyse und Berichterstattung. Leitstellen, deren Aufbau und Betrieb einen erheblichen Aufwand verursacht, können verbundweit oder städteübergreifend tätig werden. Für kleinere Unternehmen und den ländlichen Raum können neue, regionale und überregional Kooperationsformen von entscheidender Bedeutung sein, um ein fahrerloses Angebot in der Fläche auch mit kleinen Flotten wirtschaftlich umsetzbar zu machen.

Die Verkehrsunternehmen haben es in der Hand, heute die Voraussetzungen für ihre zukünftige Kooperationsfähigkeit und Effizienz zu schaffen, indem sie von Anfang an zusammenarbeiten und die Ankopplungsfähigkeit ihrer Prozesse und Systeme sicherstellen.

Hamburger Hochbahn AG
Steinstraße 20
20095 Hamburg
Telefon: +49 (0)40 3288-0
E-Mail: info@hochbahn.de
hochbahn.de

Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e. V. (VDV)
Kamekestraße 37-39
50672 Köln
Telefon: +49 (0)221 57979-0
E-Mail: info@vdv.de
www.vdv.de

VDV Die Verkehrsunternehmen | HOCHBAHN