



ÖPNV der Zukunft

Whitepaper des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR)

Inhaltsverzeichnis

Executive summary _____	3
Status Quo & Motivation für die Transformation des öffentlichen Personennahverkehrs _____	5
Die Zukunft des Schienenverkehrs – Automatisierung als technologischer Schlüssel _____	8
Zusammenwirken von Schiene und Straße _____	12
Zielbild: integriertes Tür-zu-Tür-Produkt statt Verkehrsträgerwettbewerb _____	14
Betriebsökonomisches Potential für automatisierte ÖPNV-Systeme _____	17
Sozio-ökonomische Effekte _____	18
Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen _____	20

Executive Summary

Der öffentliche Personennahverkehr (ÖPNV) bildet ein wichtiges Rückgrat der Mobilität in Deutschland. Insbesondere in Städten und in der Verbindung des Umlands mit Städten und Metropolregionen erfreut er sich großer Nachfrage. Jedoch steht der deutsche Nahverkehr vor einer grundlegenden Transformation. Auf der einen Seite treiben steigende Mobilitätsanforderungen, der Fachkräftemangel und die ambitionierten Klimaziele eine rasche technologische Weiterentwicklung voran. Auf der anderen Seite stellt die Automatisierung – von Fahrerassistenzsystemen bis hin zu vollautonomen Fahrzeugen – neue Herausforderungen in den Bereichen Sicherheit, Regulierung und Arbeitsbedingungen dar. Dieser Bericht fasst die wichtigsten Entwicklungen, wirtschaftlichen Auswirkungen und die daraus resultierenden Veränderungen für die Beschäftigten im ÖPNV zusammen und bietet Politik und Wirtschaft konkrete Handlungsempfehlungen für die nächsten fünf bis zehn Jahre.

Der Weiterentwicklung des ÖPNV und einer Teilautomatisierung fällt eine entscheidende Rolle für die Gestaltung eines wirtschaftlichen und vor allem resilienten Mobilitätssystems in Deutschland zu. Bedarf besteht insbesondere im ländlichen Raum und in peripheren Regionen, wo das Schienennetz über viele Jahrzehnte oft ausgedünnt wurde und das öffentliche Verkehrsangebot oft nicht über den Schülerverkehr hinausreicht. Auch verhindern hohe Betriebskosten und eine niedrige Nachfragedichte bislang einen Ausbau nach dem Schema fixer Fahrplan- und Linienverkehre.

Während die Nachfrage nach klimafreundlicher Mobilität steigt, gerät das System durch fehlende Fachkräfte unter Druck: Laut aktuellen Daten der DB Regio werden bis zum Jahr 2045 rund 71 % des heutigen Fahrpersonals in den Ruhestand treten. Um eine Reduzierung des Angebots zu verhindern und die gesetzlich verankerte Daseinsvorsorge zu sichern, ist der Übergang zum vollautomatisierten Fahren und Betrieb (Level 4 / GoA 4) nicht mehr nur eine technologische Option, sondern auch eine Möglichkeit, dem entgegenzutreten.

In Deutschland werden derzeit vier zentrale Automatisierungskategorien im Nahverkehr eingesetzt oder erprobt:

- **Fahrerlose und teilautomatisierte Bus- und Bahnlinien:** hier wird bereits Level 4-Technologie in Pilotprojekten wie dem „Über-Momenta“ in München getestet.
- **Hochautomatisierte LKW:** im Rahmen von Level 4-Trials, etwa bei Wayve oder Pony.ai, werden Gütertransporte auf deutschen Autobahnen ohne menschliche Fahrernde erprobt.
- **V2X-Kommunikation:** Projekte wie KIRA oder NGT-Taxi nutzen 5G-Netze, um Echtzeit-Informationen zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur auszutauschen.
- **Teleoperation (Remote-Control):** die DLR-Projekte ATO-Cargo und Hi-Drive demonstrieren die Steuerung von Eisenbahnen und LKW aus entfernten Leitstellen.

Die Reifegrade variieren. Während automatisierte Züge in GoA 4 in abgeschlossenen Systemen wie der Nürnberger U-Bahn bereits seit einigen Jahren im Einsatz sind, befinden sich autonome LKW noch in der Pilotphase. Die Integration von Fahrerassistenzsystemen (z.B. Adaptive Cruise Control, Lane Keeping Assist) liegt bereits in vielen neuen Fahrzeugmodellen vor, während die vollständige Automatisierung in der Straße sowie bei den Vollbahnen des Schienenverkehrs noch einige regulatorische Hürden zu überwinden hat.

Die vorliegende Analyse des DLR verdeutlicht, dass dieser Wandel weit über den bloßen Ersatz von Fahrpersonal hinausgeht. Der technologische Schlüssel liegt in der Synergie zwischen Schiene und Straße. Während die Automatisierung der Schiene – insbesondere durch innovative Konzepte wie das DLR „Schienentaxi“ – die Revitalisierung stillgelegter Nebenstrecken im ländlichen Raum ermöglicht, fungieren autonome On-Demand-Shuttles auf der Straße als hocheffiziente Zu- und Abbringer. Nur durch diese nahtlose Integration lässt sich das Risiko umgehen, dass kommerzielle Robotaxi-Flotten die städtische Verkehrsbelastung um mehr als 40 % erhöhen könnten.

Wirtschaftlich betrachtet transformiert die Automatisierung den ÖPNV von einem personalkostenintensiven Zuschussgeschäft zu einem hocheffizienten System. Das maximale Kosteneinsparpotenzial durch Automatisierung liegt bei ca. 33%. Das Potenzial zur Reduktion der Betriebskosten auf Nebenbahnen beträgt rund 33 %, und im straßengebundenen On-Demand-Verkehr sind sogar Einsparungen von über 50 % möglich. Gerade in ländlichen Regionen, wo der Betrieb nicht kostendeckend erscheint, kann sich durch diese Einsparungen der Einsatz von Technik zur Automatisierung schnell amortisieren.

Dadurch, dass in den nächsten Jahren nicht mehr genug Fahrpersonal zur Verfügung stehen wird, müssen Tätigkeiten zwangsweise automatisiert werden. Auch wenn nur Teilschritte in der Automatisierung umgesetzt

werden, bspw. die automatisierte Bereitstellung von Fahrzeugen, kann dies die Tätigkeiten des Fahrpersonals entlasten. Der Einsatz des Personals kann, in diesem Fall für die eigentliche Hauptaufgabe der Streckenfahrt, konzentriert werden. Auf der einen Seite verringert sich so der Bedarf nach Fahrpersonal, auf der anderen Seite entstehen neue Tätigkeiten, bspw. Technikpersonal für Teleoperation, Wartungspersonal für Sensorik und Software. Studien zeigen, dass die Gesamtkosten für Personal im ÖPNV um 30 % sinken können, wenn gleichzeitig neue Qualifikationen geschaffen werden.

Der Vergleich sollte jedoch nicht ausschließlich auf die Betriebs- und Personalkosten reduziert werden. Der strategische Hebel liegt vor allem auch in der Schienenautomatisierung. Innovative Ansätze wie das automatisierte Schienentaxi (bspw. das Aachener Rail Shuttle oder das DLR NGT Taxi) ermöglichen es erstmals, die Betriebs- und Beförderungsqualität der Schiene in effizientere, bedarfsabhängigere Bedienkonzepte zu überführen, in die Fläche zu bringen und damit stillgelegte Infrastruktur wieder sinnvoll zu nutzen.

Die Automatisierung benötigt jedoch auch Investitionen und Streckenerüchtigungen. Hierzu gehören die Modernisierung von Signalanlagen (z. B. ETCS) und die Bereitstellung einer digitalen Infrastruktur (z.B. 5G-Telekommunikation). Diese erfordern hohe Anfangsinvestitionen. Dennoch amortisieren sich diese Kosten in einem Zeitraum von 5-10 Jahren durch Betriebseinsparungen und durch den Mehrwert, der durch die verbesserte Service- bzw. Angebotsqualität entsteht.

Über diese betriebswirtschaftlichen Kennzahlen hinaus ergeben sich massive katalytische Effekte für den Wirtschaftsstandort Deutschland in Höhe von 86 Milliarden Euro. Automatisierte Verkehrssysteme stärken direkt die regionale Wertschöpfung und die Attraktivität ländlicher Räume. Dies steigert die regionale Produktivität und schafft neue Wirtschaftsfelder, die wiederum den ÖPNV als Teil eines größeren Mobilitätsnetzes stärken.

Um diese Potenziale zu heben, sind auch regulatorische Randbedingungen zu bewerten. Betrachtet werden kann auch eine Modernisierung der Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO) hin zu risikobasierten Sicherheitsansätzen, die einen Mischbetrieb von automatisierten Leichtfahrzeugen und konventionellen Zügen erlauben würde. Zudem sollten die Trassenpreissysteme in diesem Kontext bewertet und die Finanzierung von singulären Pilotprojekten hin zur großflächigen Skalierung integrierter Gesamtsysteme in nationalen Modellregionen gelenkt werden. Das DLR empfiehlt daher die nachfolgenden Handlungsempfehlungen, die eine Umsetzung zielgerichtet ermöglichen:

- In Anbetracht der technologischen Entwicklungen im Verkehrssektor und des dringenden Bedarfs an nachhaltigen Mobilitätslösungen sollte eine gezielte Integration von automatisierten Schienenpersonenverkehrssystemen (SPNV) als Ergänzung zu den bereits laufenden Projekten des automatisierten Straßenverkehrs erfolgen. Dies kann zunächst in einem speziell ausgestatteten Testfeld sowie in einer ausgewählten Modellregion als Reallabor erprobt und betrieben werden.
- Die Realisierung eines On-Demand-Schienentaxis in einer ausgewählten Region, das flexibel die Nachfrage auch bei starker zeitlicher Streuung und in Randzeigen bedient, bietet die Möglichkeit, den Servicegrad des öffentlichen Nahverkehrs erheblich zu erhöhen. Durch den Einsatz modular aufgebauter, leichter Fahrzeugkonzepte kann die besondere Nachfrage in ländlichen Regionen bedient werden.
- Ein Bottom-Up-Ansatz, der zunächst experimentell und modular startet und sukzessive auf einen prototypischen Regelbetrieb ausgebaut wird, ist ratsam. Durch die schrittweise Ausweitung lassen sich technische Risiken und Anpassungsbedarfe frühzeitig erkennen und adressieren, während gleichzeitig ein solides Fundament für die spätere Skalierung gelegt wird.
- Die Analyse und Bewertung der bestehenden Zertifizierungs- und Zulassungsprozesse unter dem Gesichtspunkt einer beschleunigten Zulassung, die die Modularität der Fahrzeuge berücksichtigt, ist ein weiterer entscheidender Aspekt der im Reallabor untersucht werden kann.
- Ein Paradigmenwechsel von passiver zu aktiver Sicherheit wird empfohlen, um gemischte Schienenfahrzeugflotten aus leichten und schweren Fahrzeugen sicher betreiben zu können.
- Eine integrierte Planung der ÖPNV-Netze unter Verbindung von autonomen Shuttles auf der Straße und dem Schienenverkehr als kapazitives Rückgrat muss unter Berücksichtigung der betroffenen wirtschaftlichen Ökosysteme und Geschäftsmodelle aller Beteiligten erfolgen.
- Transferprojekte sollten gezielt gefördert werden, um die technische Reife (TRL) des automatisierten Verkehrs auf Straße und Schiene weiter zu entwickeln und die notwendigen regulatorischen sowie ökonomischen Rahmenbedingungen zu schaffen.

Ziel ist ein ÖPNV, der als automatisiertes, wirtschaftlich tragfähiges Rückgrat des Verkehrssystems fungiert.

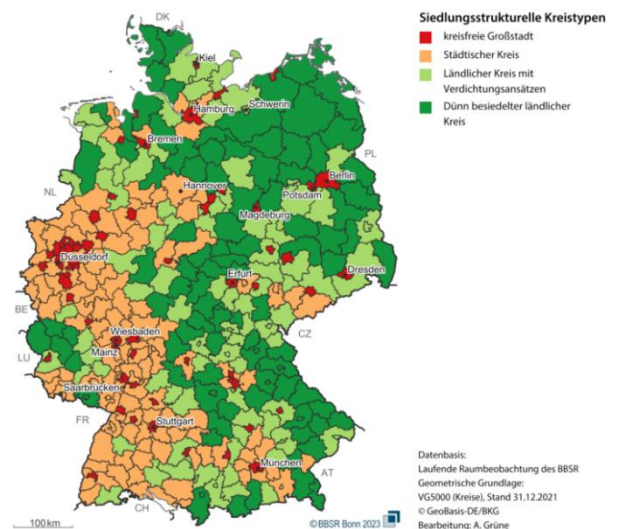
Status Quo & Motivation für die Transformation des ÖPNV

Die Treiber der Transformation des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) leiten sich aus den aktuellen Herausforderungen im Status Quo ab. Mobilität ist essentiell für die Lebensgestaltung (Ausbildung & Arbeit, Versorgung, kulturelle Teilhabe, Bedürfnis nach sozialen Kontakten). Der ÖPNV beeinflusst die Teilhabe am öffentlichen Leben, ermöglicht wirtschaftliche Entwicklung, schont den Ressourcenverbrauch und ist somit wesentlicher Faktor für die Lebensqualität. Der ÖPNV stellt eine Kernfunktion der Daseinsvorsorge dar. Diese beschreibt die Aufgabe des Staates, die Grundversorgung mit bestimmten Gütern oder Dienstleistungen sicherzustellen, die für das Funktionieren der Gesellschaft erforderlich sind (herleitbar aus dem Artikel 20 des Grundgesetzes). Neben der Daseinsvorsorge werden auch Ansprüche seitens des Fürsorgeauftrages durch das Angebot des öffentlichen Verkehrs erfüllt. Neben der resilienten Grundversorgung mit Mobilitätsangeboten für alle, sind Tarife für einkommensschwache Menschen gemeint und die Unterstützung von Menschen, die keinen unmittelbaren Zugang zum motorisierten Individualverkehr haben.

Öffentlicher Straßenpersonenverkehr (ÖSPV) in ländlichen Raum

Der ÖSPV ist das Herzstück der deutschen Mobilität, steht jedoch vor einer Reihe struktureller und personeller Herausforderungen, die eine tiefgreifende Transformation erfordern:

- **Raumstruktur und Netzausrichtung:** Die ÖPNV-Angebote konzentrieren sich vermehrt auf die (sternenförmige) Anbindung zu zentralen Orten (Mittel- und Oberzentren), während Rand und ländliche Gebiete, die einen Großteil der Fläche Deutschlands ausmachen, aus wirtschaftlichen Gründen unterversorgt bleiben.
- **Bevölkerungsdichte und Angebot:** In dünn besiedelten Räumen geht das ÖSPV-Angebot häufig nicht über die Daseinsvorsorge und die Schülerbeförderung hinaus. Zeitlich und räumlich unzureichende Busverbindungen führen zu Mobilitätseinschränkungen, die nur durch einen PKW kompensiert werden können.
- **Schülerbeförderung:** Die Schülerbeförderung bindet einen wesentlichen Teil der Haushaltsmittel ländlicher Kreise, die für den ÖSPV zur Verfügung steht, und ist im besonderen Maße vom Schülerspezialverkehr (z.B. Taxilösungen) beeinflusst. Dieser Bereich verursacht besonders hohe Kosten.
- **Kostenstruktur:** Der Kostendeckungsgrad liegt im Durchschnitt bei 50 %¹, in dünn besiedelten ländlichen Räumen darunter. Etwa zwei Drittel der Ausgaben gehen auf das Fahrpersonal zurück, dessen Kosten steigen. Dies limitiert sowohl die Ausweitung des Angebots als auch die Flexibilität bei spontanen Ausfällen. On-Demand-Verkehr nach §44 PBefG Linienbedarfsverkehr hat die Anbindung des ländlichen Raumes in über 80 Regionen in Deutschland insbesondere zu Bahnhöfen des SPNV verbessert. Die Aufgabenträger stehen jedoch vor der Herausforderung der Weiterfinanzierung dieser Angebote.
- **Fachkräftemangel:** Die Altersstruktur sowie die Ausbildungszahlen in den Verkehrsbetrieben zeigen, dass sich die bereits jetzt angespannte Situation bezüglich der Verfügbarkeit an Fahrpersonal in den kommenden Jahren verschärfen wird.
- **Finanzierungsbegründung:** Das Fehlen von Analysen, die externe Effekte (z.B. Verkehrsanbindung, Immobilienwerte, CO₂ Reduktion, Wider-Economic-Benefits) internalisieren, erschwert die Belegbarkeit der Finanzierung von ÖSPV-Angeboten. Dies betrifft insbesondere die Weiterfinanzierung von flexiblen und bedarfsorientierten Angeboten.
- **Resilienzanforderungen:** Krisen wie Pandemien, Energieknappheit oder Klimawandel erfordern robuste Systeme und schnelle Reaktionsmöglichkeiten. Redundanzen im System sind aufgrund der knappen zur Verfügung stehen Mittel kaum vorhanden.



Unterscheidung der Siedlungsart in Deutschland.
Erkennbar ist die Fülle des dünnbesiedelten, ländlichen Raums (dunkelgrün)

¹ Finanzierungsbedarf des ÖPNV bis 2025 (<https://www.staedtetag.de/files/dst/docs/Publikationen/Weitere-Publikationen/Archiv/oepnv-finanzierungsbedarf-bis-2025-studie-2009.pdf>), S. 55.

Schienenpersonennahverkehr (SPNV) im ländlichen Raum

Der SPNV befindet sich in einem ähnlichen, aber technisch und infrastrukturell komplexeren Kontext mit speziellen Herausforderungen, die über die des ÖSPV hinaus gehen:

- **Hohe Infrastrukturkosten in Relation zur Beförderungsleistung:** Viele regionale (Neben-)Strecken sind eingleisig und nicht-elektrifiziert. Oftmals liegt eine veraltete Sicherungstechnik vor, deren Wartung und Instandhaltung kostenintensiv ist. Geringe Anzahl an Kreuzungsbahnhöfen begrenzen die Leistungsfähigkeit und verhindern höhere Takte für passgenaue Anschlüsse. Aufgrund Trassierungsparameter und kostenintensiver technisch gesicherter Bahnübergänge weist diese Infrastruktur in der Regel eine niedrigere Strecken höchstgeschwindigkeit auf. Eine technische Bahnübergangssicherung verursacht hohe Kosten im Vergleich zur nicht-technischen Sicherung. Deutlich höhere Kosten kommen bei Überführungsbauwerken zum tragen und sind umzusetzen, wenn der Bestandsschutz des Bahnübergangs nicht mehr geltend gemacht werden kann.
- **Stillgelegte Strecken und Streckenreaktivierung, auch im Sinne der Resilienz Anforderungen:** Viele Schienenstrecken wurden bis Ende des 20. Jahrhunderts stillgelegt. Die potenzielle Nachfrage nach einer Reaktivierung dieser Strecken ist vorhanden, jedoch ist die Modernisierung der Infrastruktur kostenintensiv. Viele Nebenstrecken werden noch für den Güterverkehr betrieben. Auch dort stehen (Re-)Investitionen an, die eher zu tragen sind, wenn auf diesen Strecken wieder Personenverkehr angeboten wird. Da im SPNV im Vergleich zum ÖSPV aufgrund eines deutlich kleineren Netzes die Verfügbarkeit der Infrastruktur eine höhere Bedeutung zukommt, sind Streckenreaktivierungen eine Möglichkeit, für Ausweichstrecken zu sorgen und so das System robuster gegen Störungen zu machen.
- **Fahrzeugkosten:** Die Anschaffung und Instandhaltung moderner Züge, die wenig lokale Schadstoffemissionen und Klimagase verursachen, binden finanzielle Mittel, die stattdessen in die Ausweitung des Angebots investiert werden könnten.
- **Personalknappheit:** Der Mangel an qualifiziertem Personal beschränkt die Ausweitung des Angebots und gefährdet bei starkem ad-hoc-Ausfall (z.B. Grippewelle) die zuverlässige Durchführung von Reiseketten.
- **Intermodalität & Reiseketten:** Flexibler, bedarfsorientierter Verkehr kann frei von starren Takten die Anschlusszeiten senken und in der Folge geringere Reisezeiten ermöglichen, die die Attraktivität des öffentlichen Verkehrs erhöhen. Dies erfordert ggf. mehr Fahrzeuge und ist im Zusammenspiel mit der Automatisierung leichter wirtschaftlich umsetzbar.

Motivation für die Transformation des ÖPNV

Die genannten Herausforderungen erschweren die Erweiterung des Angebots und die Erhöhung der Angebotsqualität, damit der ÖPNV seinen Anteil am Modal Split gewährleistet und insbesondere im ländlichen Raum über minimale Anforderungen im Sinne der Daseinsvorsorge hinauskommt. Hier trifft der ÖPNV auf geringe Nachfragevolumina und lange Fahrtstrecken, wo kein Zug mehr verkehrt und Menschen kaum Zugang zum öffentlichen Verkehr haben.

Dem Wunsch nach zusätzlichen Verkehren für den ÖSPV sowie für den ÖPNV steht der zukünftig steigende Bedarf an benötigten Fachkräften gegenüber. Eine Studie des VDV² kommt zu dem Ergebnis, dass bereits heute 20.000 Busfahrende und 3.000 Triebfahrzeugführende fehlen und dass jährlich bis zu 6.000 Mitarbeitende aus dem Fahrdienst (Bus und Tram) in den Ruhestand gehen werden. Laut aktuellen Daten der DB Regio werden bis zum Jahr 2045 rund 71 % des heutigen Fahrpersonals in den Ruhestand treten³. Um eine Erhöhung des Angebots bis 2030 zu ermöglichen, sind von den Verkehrsunternehmen rund 21 % zusätzliche Mitarbeiter einzustellen, um die politisch motivierten Wachstumsziele der Verkehrswende zu erreichen.

Um im ÖPNV also nicht Gefahr zu laufen, das Angebot ab- anstatt auszubauen, kommt mit der Automatisierung eine neue Technologie gerade im richtigen Moment zur Anwendung. Aus den Darstellungen der aktuellen Situation im Straßen- und Schienenverkehr leitet sich insbesondere die Automatisierung auf verschiedenen Ebenen als Treiber für die Transformation des Verkehrssystems ab:

- **Personalknappheit:** Automatisierte Systeme können Fahrzeuge sowie Einsatzplanung steuern bzw. unterstützen, wodurch der Bedarf an Fahr- und Dispositionspersonal reduziert wird. Vorhandenes Personal kann optimaler eingesetzt werden und Angebote können unabhängiger vom Fachkräftemarkt ausgeweitet werden.

² VDV (2023): „Und wer fährt? – Personal- und Fachkräftemangel im ÖPNV“ online: <https://www.vdv.de/personal-und-fachkraeftebedarf-im-oePNV.aspx>; zuletzt aufgerufen am 02.02.2026.

³ DB Regio AG (2025) Autonomes Fahren – Schlüssel zur Mobilität von morgen (01-2026_Langversion_Studie-Autonomes-Fahren-Schluesel-zur-Mobilitaet-von-Morgen-data.pdf).

- **Flexibilität:** Digitalisierung ermöglicht On-Demand-Verkehr, der sich dynamisch an Nachfrageänderungen anpasst und so besser intermodale Reiseketten mit geringeren Reisezeiten ermöglicht. Die Automatisierung unterstützt dabei die dafür notwendige Angebotsausweitung bei den zur Verfügung stehenden Mitteln.
- **Resilienz:** Durch Unabhängigkeit von der Verfügbarkeit des Fahrpersonals erhöht die Automatisierung die Kontinuität des Verkehrs, insbesondere bei Krankheitswellen und in Krisensituationen.
- **Umweltverträglichkeit:** Die Automatisierung des Fahrbetriebs unterstützt eine energieeffiziente Fahrweise.



Personalknappheit führt zu der Schwierigkeit ein verlässliches Angebot zu ermöglichen. (Quelle: DLR)

Die Automatisierung stellt somit einen zentralen Treiber für den ÖPNV dar, der sowohl die strukturellen personellen Engpässe als auch die steigenden Anforderungen an ein verfügbares und verlässliches Angebot über der Daseinsvorsorge adressiert und damit die Transformation des öffentlichen Personennahverkehrs maßgeblich vorantreibt. Es wird vielleicht nicht jeder Bus oder jede Bahn in naher Zukunft automatisiert unterwegs sein, aber für ausgewählte Bereiche sind hierdurch Angebote möglich, die heute schlicht nicht realisierbar erscheinen.

Zusätzlich trifft die Automatisierung mit der Digitalisierung auf einen weiteren technologischen Treiber, mit dem sich gemeinsam eine neue Dimension für den ÖPNV erschließt. Mit den Möglichkeiten der Digitalisierung im Sinne von Mobilitätsplattformen lassen sich nicht nur einzelne Verkehrsangebote online buchen, sondern auch das Zusammenwirken verschiedener Verkehrsträger wird weiter unterstützt und bietet den Nutzenden attraktive intermodale Reiseketten. Ein On-Demand-Shuttle bietet dann nicht nur eine Fahrt zur nächsten Haltestelle des Linienverkehrs, sondern den vernetzten Einstieg in eine vollständige Reisekette von Tür zu Tür. Wer einmal im Auto sitzt, fährt meist bis zum Ziel damit weiter. Daher ist es gerade die Bereitstellung von öffentlicher Mobilität an der Haustür der Menschen, die erst das volle Potenzial des Linienverkehrs aktivieren kann. Mit On-Demand-Shuttles kann diese Mobilitätvorsorge effektiv gelöst werden. Mit der Automatisierung wird dies in Zukunft kosteneffizienter gestaltet werden können. Gemeinsam mit der Digitalisierung bietet dies die Chance attraktive und verlässliche Mobilitätsangebote des öffentlichen Verkehrs für alle Bürgerinnen und Bürger zu schaffen, auch in ländlichen Räumen.

Die Zukunft des Schienenverkehrs – Automatisierung als technologischer Schlüssel

Wie in den vorherigen Kapiteln bereits adressiert, steht auch schienenseitig die Automatisierung im Fokus der zukünftigen Mobilität in Deutschland. Während die Straßenverkehrsleistung und auch die Automatisierung allein die heutigen Verkehrsprobleme nicht lösen können⁴, bietet die Automatisierung auf der Schiene ein enormes Potenzial für effizientere, zuverlässigere und nachhaltigere Mobilitätslösungen, um das Verkehrsaufkommen auch zukünftig abbilden zu können. Dieses Kapitel beleuchtet daher die technologischen Grundlagen, die Vorteile und die Herausforderungen der Automatisierung im Schienenverkehr auf Infrastruktur- und Fahrzeugseite und plädiert für eine strategische Förderung, um die Umsetzung zu beschleunigen. Dabei liegt der Fokus auf einem umfassenden Ansatz, der technologische Innovationen, wirtschaftliche Aspekte und die Notwendigkeit einer starken politischen Unterstützung berücksichtigt.

Entwicklung des automatischen Bahnbetriebs

Heutige Erfahrungen mit voll automatisierten Bahnsystemen finden hauptsächlich im Bereich der People Mover, U-Bahn- und S-Bahn-Systeme statt. Diese haben in der Regel den entscheidenden Vorteil, dass dies abgeschlossene oder artreine Systeme sind. Dennoch zeigen die Erfahrungen aus diesem Bereich, wie der METEOR-Strecke in Paris (Métro Est-Ouest Rapide), der Metro in Lille und der Metro Nürnberg, deutlich die Vorteile der Automatisierung. Diese Systeme haben zu signifikanten Verbesserungen in Energieeffizienz, Pünktlichkeit und Betriebskosten geführt (siehe „Vorteile der Automatisierung im Metro-System“). Der Weg zur vollständigen Automatisierung im Schienenverkehr ist jedoch kein linearer Prozess.

Weltweit machen GoA 4-Systeme mittlerweile einen Anteil von fast 50 % bei der Neuinbetriebnahme von Metro- und ÖPNV-Systemen aus. Diese Entwicklung wird maßgeblich durch die breite Einführung hochautomatisierter Systeme in Megacities, vor allem im asiatisch-pazifischen Raum⁵ vorangetrieben. Im Vergleich dazu ist in Europa die Neubautätigkeit geringer, hier erfolgt vorwiegend die Konversion oder der Ausbau bestehender Systeme (vgl. u.a. U-Bahn Nürnberg, S-Bahn Hamburg). Mittlerweile sind hoch-automatisierte ÖPNV-Systeme in vielen Regionen der Erde vertreten und ihr gegenwärtiger Marktanteil liegt in etwa bei 7 % (bezogen auf die Streckenlänge). Jedoch ist der dieser Marktanteil steigend^{5, 6}.

Automatisierung kurz erklärt: Die standardisierte Definition der Automationsgrade (GoA - Grade of Automation) – definiert über die IEC 62267 "Automated Urban Guided Transport" – bietet einen Rahmen für die Entwicklung und den Einsatz automatisierter Systeme. GoA 4, der höchste Automationsgrad, ermöglicht den unbegleiteten Betrieb ohne Personal im Zug und bietet das Potenzial, die Wirtschaftlichkeit entscheidend zu erhöhen. Aktuelle Arbeiten und Tests, insbesondere im Rahmen von „ATO over ETCS“ (Automated Train Operation bzw. European Train Control System), sind entscheidend für die Weiterentwicklung und Implementierung der notwendigen Technologien. Der Erfolg dieser Systeme hängt jedoch von der frühzeitigen Standardisierung und der Akzeptanz aller Beteiligten ab.

<p>Hauptstrecke und Regionalverkehr (z.B. ETCS Knoten Stuttgart GoA2)</p>	<p>Selbstfahrende Metro (z.B. Nürnberg seit 2008 GoA4)</p>	<p>Nebenstrecke, Bereitstellung & Depot (Erprobungsprojekte GoA4 2026)</p>
		
<p>Fahrzeug und Infrastruktur müssen ausgerüstet werden</p>	<p>17 in der EU in Betrieb, 9 in Planung „geschlossene Systeme“</p>	<p>Laufende Forschungs- und Demonstrationsprojekte (Jan. 26)</p>

Unterschiedliche Automatisierung und Anwendung im Schienenverkehr (Quelle: DLR)

⁴ Agora Verkehrswende (2020): Die Automatisierung des Automobils und ihre Folgen. Chancen und Risiken selbst-fahrender Fahrzeuge für nachhaltige Mobilität.

⁵ Union Internationale des Transports Publics: World Report on Metro Automation – Statistics in Brief, Brüssel, 2018.

⁶ Morast, Albrecht; Weik, Norman; Meirich, Christian; et al. (2022) Leistungsfähigkeit hochautomatisierter schienenbasierter ÖPNV-Systeme.

Vorteile der Automatisierung im Metro-System (geschlossenes Bahnsystem)

Die nachfolgenden Vorteile konnten in den letzten Jahren im Metrobereich ermittelt werden und dienen als Anforderungen für die Automatisierung im Eisenbahnsystem.

- **Energieeinsparungen:** Heutige Fahrerassistenzsysteme bieten durch eine optimierte Fahrtrajektorie die Möglichkeit, bis zu 15 % Energie einzusparen.⁷ Da aus einer Fahrempfehlung im automatisierten System ein Fahrbefehl wird, sind mindestens diese Einsparpotentiale auch für die Automatisierung anzunehmen. Expertenschätzungen gehen sogar von einer Verdopplung des Einsparpotentials aus⁸. Die energiesparende Fahrweise ist auf optimierte Beschleunigung, Bremsungen und die Vermeidung unnötiger Fahrten zurückzuführen. Dies reduziert nicht nur die Betriebskosten, sondern trägt auch zur Reduzierung des Verschleißes und des CO₂-Fußabdrucks des Schienenverkehrs bei.
- **Erhöhte Taktdichte:** Durch die Automatisierung kann die Taktdichte deutlich erhöht werden. Beispielsweise von 200 auf 100 Sekunden in der Metro Nürnberg, was zu einer höheren Auslastung der Strecken führt, damit gleichzeitig die Kapazität erhöht und die Wartezeiten verkürzt.
- **Kosteneinsparungen:** Automatisierte Systeme können Betriebskosten im Vergleich zu konventionellen Systemen reduzieren, einschließlich der Reduzierung von Personal und Wartungskosten (verschleißabhängig). Jedoch müssen die Ausrüstungskosten für die einzusetzende Technik berücksichtigt werden.
- **Verbesserte Pünktlichkeit:** Bei der U-Bahn Nürnberg erreichte die Automatisierung nahezu eine Pünktlichkeit von 100 %, was das Vertrauen der Fahrgäste stärkt, die Warteschlangen reduziert und die Effizienz des gesamten Systems erhöht.
- **Höhere Durchschnittsgeschwindigkeiten:** Automatisierte Systeme ermöglichen höhere Durchschnittsgeschwindigkeiten, beispielsweise 35 km/h in der Kopenhagen Metro, was die Reisezeit verkürzt und die Attraktivität des Schienenverkehrs erhöht.
- **Erhaltung der Sicherheit mit reduziertem Aufwand:** Das Risiko von sicherheitsbezogenen Störungen und Unfällen kann durch die Automation und die damit einhergehende Reduktion der menschlichen Faktoren verbessert werden. Darüber hinaus kann die Komplexität von vollautomatischen Systemen und damit auch der Zulassungsaufwand reduziert werden.

Eigenschaften des automatisierten Fahrens auf der Schiene (offenes System)

Aus den vorhergegangenen Erkenntnissen aus Metro- und U-Bahnsystemen können daher die folgenden Eigenschaften für die Automatisierung des Eisenbahnsystems abgeleitet werden:

- **Optimierte und exakte Fahrweise (Fahrtrajektorie):** Automatisierte Systeme gewährleisten eine präzise und effiziente Fahrweise und können so die Pünktlichkeit der Fahrzeuge erhöhen. Die Systeme passen sich zielgerichtet an die vorgegebenen Optimierungsziele aus der Leitzentrale an, ohne Umsetzungsverluste durch eine Mensch-Maschine-Interaktion.
- **Hohe Bremsgenauigkeit:** Die präzise Einhaltung der Fahrtrajektorie ermöglicht eine sichere und zuverlässige Bremsung und gleichzeitig eine zielgerichtete Steuerung des Verschleißes.
- **Automatische Abfertigung:** Die Systeme automatisieren den Abfertigungsprozess und den optimalen Ressourceneinsatz bei Tätigkeiten der Bereit- und Abstellung.
- **Kein Personal im Zug (GoA 4):** Die Automatisierung ermöglicht den Betrieb ohne Personal im Zug und damit in der konsequenten Anwendung eine hochgradig flexible Anpassung an den Bedarf – insbesondere in Schwachlastzeiten.

Dabei basiert die Automatisierung im Schienenverkehr und das Erreichen dieser Ziele auf einem Zusammenspiel verschiedener Technologien:

- **Sensorik:** Eine Vielzahl von Sensoren, darunter Kameras, Laserscanner, Radar und Ultraschallsensoren, sammeln Daten über die Umgebung und den Zustand des Zuges.
- **Künstliche Intelligenz (KI):** KI-Algorithmen analysieren die gesammelten Daten und unterstützen bei der Entscheidungsfindung in Echtzeit, beispielsweise, um zu ermitteln, wann wo wie schnell gefahren oder gebremst werden muss, oder die Routenoptimierung. Die Ausführung dieser Entscheidungen werden dann über die konventionellen Systeme der Regelungstechnik (Geschwindigkeitsregelung bzw. Bremssteuerung) übernommen.

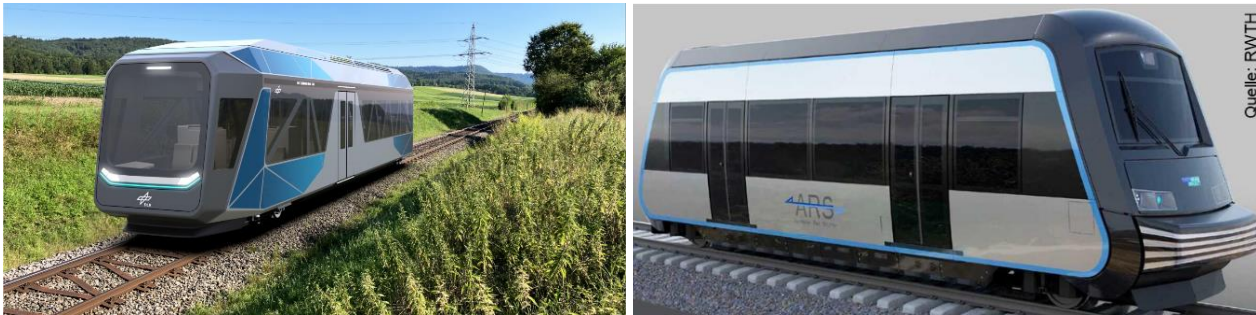
⁷ MRK Management Consultants GmbH: Marktüberblick Fahrerassistenzsysteme. 2018.

⁸ Clemens Gleich, Autonome Züge: einfacher als im Straßenverkehr, 28.05.2024 online: <https://www.heise.de/hintergrund/Autonome-Zuege-einfacher-als-im-Strassenverkehr-9736590.html>, zuletzt abgerufen am 20.01.2026.

- **Kommunikation:** Die Systeme kommunizieren miteinander und mit der Zugsteuerung, um Informationen auszutauschen und die Sicherheit zu gewährleisten.
- **Datengesteuerte Entscheidungsfindung:** Die gesammelten Daten werden kontinuierlich analysiert, um die Leistung des Systems zu optimieren und zukünftige Verbesserungen zu identifizieren.

Zukünftige Fahrzeugkonzepte und die Reaktivierung von regionalen Eisenbahnstrecken

Wie bereits oben beschrieben, sind der Fachkräftemangel sowie die Daseinsvorsorge Aspekte, welche die Automatisierung insbesondere für den ländlichen Raum attraktiv machen (vgl. Status Quo & Motivation für die Transformation). Weniger genutzte Strecken und Strecken zur Reaktivierung spielen eine entscheidende Rolle für die Verkehrsanbindung ländlicher Gebiete und als Zubringer zum Hauptnetz. Auf diesen Strecken ist in der Regel aber eine geringere Anzahl an Fahrten bzw. Taktdichte wirtschaftlich. Dies widerspricht oftmals den Anforderungen der Fahrgäste und macht die Nutzung des Bahnsystems in diesen Regionen unattraktiv.



Kleinere, wirtschaftlichere und hoch automatisierte Schienenfahrzeuge für den Einsatz auf Strecken im ländlichen Raum, hier: beispielhaft das NGT Taxi (links, Quelle DLR) und das Aachener Rail Shuttle (rechts, Quelle RWTH)

Ein Ziel ist es daher, kleinere, wirtschaftlichere und automatisierte Schienenfahrzeuge (bspw. das Aachener Rail Shuttle (ARS, RWTH), Monocap (RailCampus OWL), DRAISY (SNCF) oder das NGT-Taxi (DLR)) auf Strecken des regionalen Schienenverkehrs einzusetzen, um so eine höhere Taktdichte und häufigere Abfahrzeiten zu erreichen und damit eine deutlichere Steigerung der Attraktivität zu erlangen. Ein hochautomatisierter Bahnbetrieb mit geeigneten Fahrzeugen kann demnach gleichzeitig die Kapazität, die Effizienz sowie die Attraktivität für Fahrgäste und Unternehmen steigern. Dies erfordert jedoch eine strategische Planung und Investition, die die folgenden Aspekte berücksichtigt:

- **Infrastruktur:** Eine moderne, zuverlässige Infrastruktur ist die Grundlage für den erfolgreichen Einsatz automatisierter Schienenfahrzeuge. Dennoch sind auch Lösungen von Relevanz, die mit einer kostengünstigeren bzw. angepassten Leit- und Sicherungstechnik auskommen, da die Automatisierung auf heutigen schwach ausgelasteten Nebenstrecken das volle Potential ausspielen kann und die Reaktivierung dieser Strecken fördert. Hierbei sind selbstverständlich bei einem steigenden Verkehrsaufkommen und dem Einsatz mehrerer Fahrzeuge entsprechende Ausweichstellen im Netz vorzusehen, damit die Fahrzeuge sich gegenseitig ausweichen können. Die vollständige Flexibilität wird in der Bündelung mehrerer Strecken gesehen, da hier auch Effizienzvorteile durch die flexible Routenwahl ermöglicht werden und ein Umsteigen vermieden werden kann.
- **Reaktivierung stillgelegter Strecken:** Die Reaktivierung stillgelegter Bahnstrecken, kombiniert mit Test- und Forschungsinfrastruktur, bietet eine kosteneffiziente Möglichkeit zur Erschließung ländlicher Gebiete. Auch können diese Strecken im Sinne der betrieblichen Resilienz als Umfahrungsstrecken (Stichwort Drehscheibe Deutschland) vorgehalten werden, um notwendige Redundanzen im System wiederzuerlangen.
- **Fahrzeuge:** Kleinere, wirtschaftlichere und hoch automatisierte Schienenfahrzeuge für den Einsatz auf Strecken im ländlichen Raum sollen an vielfältige Betriebszwecke angepasst sein, um sowohl den gemischten Betrieb mit konventionellen Zügen als auch den Einsatz auf separaten Strecken zu ermöglichen. Die Entwicklung berücksichtigt dabei spezifische Anforderungen hinsichtlich Energieeffizienz, Sicherheitsstandards und der Integration in bestehende Schienennetzstrukturen. Das Ziel ist es, mit dem Einsatz innovativer, automatisierter Schienenfahrzeuge eine kritische Masse von Fahrzeugen (Made in Germany) zu schaffen, die einerseits die Mobilitätsversorgung verbessert und andererseits die Zukunftssicherung der Schienenfahrzeughersteller und damit Arbeitsplätze sichert.
- **Bis zu 24/7-Betriebsdienst:** Durch den Einsatz dieser kleineren, hoch-automatisierten Schienenfahrzeuge kann ein bedarfsgerechtes Bedienkonzept (on-demand oder fahrplangesteuert) eingerichtet werden, was jedoch Anpassungen sowohl an die Infrastruktur (Ausweichstellen), als auch an die Leit- und Sicherungstechnik erfordert. Ein rund um die Uhr verfügbarer Schienenverkehr erhöht die Attraktivität der Bahn.

- **Standardisierung:** Die Einführung gemeinsamer Standards und Schnittstellen erleichtert die Interoperabilität und reduziert die Betriebskosten, sowohl bei der Infrastruktur als auch auf Fahrzeugseite.
- **Neuer Markt für autonome Schienenshuttles aus Deutschland:** In Kooperation der Bundesländer untereinander ließe sich eine kritische Masse für die Anschaffung der benötigten Fahrzeugkonzepte schaffen, für die es über Deutschland hinaus einen europäischen und internationalen Markt gibt.

Herausforderungen und Zukunftsperspektiven des Schienenpersonennahverkehrs

Trotz der vielversprechenden Potenziale gibt es natürlich auch Herausforderungen, die bewältigt werden müssen:

- **Regulatorische Rahmenbedingungen:** Die aktuellen regulatorischen Rahmenbedingungen müssen an die Anforderungen der Automatisierung im Schienenverkehr angepasst werden. Darunter fallen unter anderem auch Anpassungen an der Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO) und der Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung (BOStrab) sowie der Anforderung an die Kollisionssicherheit⁹.
- **Sicherheitsstandards:** Die Etablierung von robusten, aber angepassten Sicherheitsstandards ist unerlässlich, um die Sicherheit des Systems zu gewährleisten.
- **Investitionssicherheit:** Für eine langfristige Planungssicherheit für Fahrzeughersteller und Zulieferer für Schienenfahrzeuge muss erkennbar werden, dass beispielsweise ein automatisierter Betrieb auf entsprechenden Strecken und die Schaffung der regulatorischen Rahmenbedingungen erfolgen sollen und so ein Anreiz geschaffen wird, die Entwicklung voran zu treiben.
- **Akzeptanz:** Die öffentliche Akzeptanz der Technologie ist ein wichtiger Faktor für den Erfolg der Implementierung.

Derzeit fehlt es an langfristigen Testumgebungen, um die Bedenken insbesondere für die Automatisierung im Schienenverkehr unter Realbedingungen zu erproben bzw. einzuführen. Dieser Bericht plädiert daher für eine umfassende Strategie, die technologische Innovationen, wirtschaftliche Aspekte und die Notwendigkeit einer starken politischen Unterstützung berücksichtigt. Nur durch eine solche Strategie kann der Schienenverkehr seine Rolle als wichtiger Bestandteil der zukünftigen Mobilitätslandschaft erfüllen.



Testumgebungen wie das RailSiTe[®] ermöglichen es, Testzyklen zu reduzieren und Sicherheitsstandards zu erhöhen. (Quelle: DLR)

⁹ DIN EN 15227 - Bahnanwendungen - Anforderungen an die Kollisionssicherheit von Schienenfahrzeugkästen.

Zusammenwirken von Schiene und Straße

Wie bis hierher ausgeführt wurde, steigert die Automatisierung nicht nur die Effizienz, sondern ist zunehmend eine Bedingung, um Daseinsvorsorge im Verkehrssystem trotz Personalengpässen stabil zu halten und gleichzeitig das Leistungsniveau zu erhöhen.

Autonomer Straßenverkehr heißt nicht automatisch stadtverträglich

Gerade in Innenstädten entsteht ein Engpass durch die begrenzte Fläche. Autonom, elektrisch und vernetzt ändert nichts daran, dass die Straßenkapazität an Knotenpunkten schnell saturiert. Daher gilt verkehrsstrategisch: Autonome Shuttles sind in Innenstädten nur dann systemdienlich, wenn sie geteilt betrieben werden (Ridepooling), takt- und anschlussorientiert agieren und den Umweltverbund stärken – nicht, wenn sie als Einzelfahrt-Ersatz für ÖPNV, Zu-Fuß oder Rad fungieren. Internationale Systemanalysen zu geteilten, (selbst-)fahrenden Flotten unterstreichen, dass die Wirkung auf den Verkehr stark davon abhängt, ob Sharing bzw. Pooling konsequent umgesetzt wird.¹⁰

Die DB-Regio-Studie quantifiziert die positive Gegenrichtung im integrierten „Daseinsvorsorge“-Zielbild: Bei einem attraktiven, flächendeckenden System mit autonomen On-Demand-Zubringern würde sich der ÖPNV-Anteil mehr als verdoppeln; zugleich sinkt die Straßenverkehrsbelastung in Metropolen und Städten um bis zu 11%.

Schiene als Hebelarm für eine zielgerichtete Mobilität

Die Schiene kann Personenströme in nachfragestarken Korridoren um eine Größenordnung effizienter bündeln als der Straßenraum. Während eine Fahrspur im MIV in der Größenordnung von 1.500 bis 2.000 Fahrzeugen pro Stunde liegt¹¹ und bei durchschnittlich etwa 1,5 Personen je Pkw¹² grob rund 3.000 Personen/h/Spur ermöglicht, erreichen Metro- bzw. S-/Suburban-Systeme etwa 15-mal höhere Spitzenwerte von über 50.000 Personen pro Stunde und Richtung.¹³ Damit ist die Schiene nicht nur leistungsfähig, sondern auch flächeneffizient. Gerade deshalb ist Automatisierung bzw. Digitalisierung auf der Schiene ein Hebel für dichtere Takte, höhere Stabilität und mehr Leistung auf begrenzter Infrastruktur.

Während straßenseitige Autonomie schnell iteriert, muss schienenseitige Automatisierung als Programm (Infrastruktur, ETCS und ATO-Roll-out, Betriebsverfahren, Qualifizierung) systematisch umgesetzt werden, um Angebotsausweitung nicht proportional an Personalverfügbarkeit zu koppeln.

ÖPNV funktioniert zielgerichtet nur als integriertes Konzept

Den beiden Verkehrsträgern Straße und Schiene kommen die folgenden Stärken zu Gute, die es gilt zu erhalten bzw. bestmöglich auszunutzen und zu verzahnen:

Stärken der Schiene (besonders auf nachfragestarken Achsen)	Stärken der Straße
hohe Beförderungskapazität	flächige Erreichbarkeit
Linienführung und Haltepunkte oft in den Zentren von Ortschaften	flexible Bedienformen (Quartier, Randzeiten, ländliche Räume)
Fahrkomfort	schnelle Anpassbarkeit von Linienwegen und Kapazitäten
robuste Reisezeit auf eigenen Trassen (weniger abhängig von Stau/Verkehr)	
Möglichkeit, Reisezeit produktiv zu nutzen (Value of Time / Zeitverwendung)	

¹⁰ International Transport Forum. (2015). Urban mobility system upgrade: How shared self-driving cars could change city traffic (PDF). https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/15cpb_self-drivingcars.pdf.

¹¹ Deutscher Bundestag, Wissenschaftliche Dienste. (2020). Ursachen von Verkehrsstaus (Dokumentation, WD 5 – 3000 – 050/20). <https://www.bundestag.de/resource/blob/709142/acf9f7b648f0899152750d20ca4af7d5/wd-5-050-20-pdf-data.pdf>.

¹² infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., & IVT Research GmbH. (2024). Mobilität in Deutschland 2023 – Kurzbericht (PDF). Bundesministerium für Digitales und Verkehr. https://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/MiD2023_Kurzbericht.pdf.

¹³ Ribeiro, S., Figueroa, M., Creutzig, F., Dubeux, C., Hupe, J., & Kobayashi, S. (2012). Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future. Chapter 9 - Energy End-Use: Transport.

Ob Straße und Schiene im Wettbewerb stehen oder ob sie synergetisch zusammenwirken, hängt von verschiedenen Faktoren sowie der Konstellation ab:

Fall 1 – Überlegenes Verkehrsmittel: Wenn ein Verkehrsmittel bezüglich der Anforderungen deutlich einem anderen Verkehrsmittel überlegen ist, so wird ein Verkehrsmittel zum Dominierenden. So ist innerhalb des ÖPNV-Marktes die S-Bahn in der Verbindung von Vororten zum Zentrum einem etwaigen Busverkehr in Geschwindigkeit und Erreichung der Zielorte deutlich überlegen. In der Folge gibt es hier keine parallelen Linienbusverkehre und bis auf weiteres keinen Wettbewerb.

Fall 2 – Wettbewerb: Wenn sich die Produktcharakteristiken ausgleichen, findet ein Wettbewerb statt. So wären On-Demand Bus-Verkehre von schlecht per Schiene angebundenen Unterzentren in Fahrzeit attraktiver als die Bahn, aber deutlich teurer. Es herrscht ein Preiswettbewerb mit heterogenen Dienstleistungen. In der Folge könnte es passieren, dass Qualitätssteigerungen auf der Straße die Schiene schwächen oder umgekehrt.

Fall 3 – Vernetztes Angebot: Wenn Busse als Zubringer und/oder Verteiler vom Schienenverkehr dienen, wobei die Busse die Flächenerreichbarkeit sicherstellen und Züge das schnelle Fortkommen auf Achsen ermöglichen, entstehen Synergien und Komplementarität. Verbesserungen auf der Straße kommen der Schiene zugute und umgekehrt.

Die aktuell deutschlandweite Studie der DB-Regio¹⁴ macht diese Fälle sehr greifbar: Sie zeigt, dass die Sorge vor Verdrängung von Linienangeboten nicht begründet ist, wenn On-Demand als integrierter Bestandteil des Gesamtsystems eingeführt wird – dann wirkt es als Zu- bzw. Abbringer und stärkt auch die Linienverkehre. Im Wettbewerbsszenario ohne Integration hingegen führt die Verlagerung auf die Straße zu erheblicher zusätzlicher Straßenverkehrsbelastung.

Für die Gestaltung des ÖPNV bedeutet dies: Im Falle von Wettbewerb (Fall 2) ist es notwendig, die örtliche Situation genau zu betrachten und Verbesserungen eines Verkehrsmittels im Kontext der Wirkungen auf ein anderes zu betrachten. Wenn möglich, ist die dritte Situation (Fall 3) anzustreben – die Vision eines vernetzten Systems, in dem die Verkehrsträger zusammenwirken und ihre Stärken zum Wohle des Gesamtsystems ausspielen können. Entscheidend ist dabei also nicht ein Modus-“Wettlauf“ zwischen Straße und Schiene, sondern ein integriertes Tür-zu-Tür-Angebot, das die Stärken beider Systeme gezielt kombiniert.



Integriertes Verkehrssystem für unterschiedliche Mobilitätsangebote (Quelle: DLR)

¹⁴ DB Regio AG (2025) Autonomes Fahren – Schlüssel zur Mobilität von morgen (01-2026_Langversion_Studie-Autonomes-Fahren-Schlüssel-zur-Mobilität-von-Morgen-data.pdf).

Zielbild: integriertes Tür-zu-Tür-Produkt statt Verkehrsträgerwettbewerb




Ein überzeugendes Zielbild auf Basis der jeweiligen Systemvorteile (vgl. Zusammenwirken von Schiene und Straße) betont die Kooperation zwischen den Verkehrsträgern, bei dem die Schiene als Backbone des Systems angesehen werden kann und die Straße die Erschließung der Fläche vornimmt.

Die Schiene kann demnach für die Langstrecke und die nachfragestarken Achsen die Vorteile der hohen Beförderungskapazität sowie einen verlässlichen Takt und damit stabilere Reisezeiten für den Fahrgast ausspielen. Wohingegen die Straße mit autonomen Shuttles als Zu- bzw. Abbringer die Verteilung in die Fläche übernimmt. So können Quartier- und Randzeitenverkehre kosteneffizient angeboten werden und sogar ländliche Räume ohne Schienenanschluss bestmöglich mit den Oberzentren verknüpft werden.

Der Wirkmechanismus ist hierbei die nahtlose Integration der Systeme. Dabei müssen sowohl die Fahrplangestaltung und die (Fahrten-)Anschlüsse systemübergreifend berücksichtigt werden und bestmöglich aufeinander abgestimmt werden. Auch ist die Buchbarkeit durch die Fahrgäste mittels einer übergeordneten Daten- und Betriebsintegration, welches in einem konsistenten Tarif- & Produktdesign mündet, vorzunehmen, so dass keine betrieblichen Hürden in der Anwendung und damit in der Attraktivität entstehen. Genau diese Logik wird in der DB-Regio-Studie im Daseinsvorsorge-Szenario als Systemvorteil herausgearbeitet: Fast 50% der Fahrten der flexiblen Angebote sind Zu- bzw. Abbringer – im Robotaxi-Wettbewerbsszenario dagegen dominieren Direktfahrten.

DLR-Ansätze als Brückenbausteine für die Straße und die Schiene

Die Realisierbarkeit eines kooperativen Zielbilds gezeigt an konkreten Transferpfaden der Automatisierung:

U-Shift und IMoGer (Straße)	KIRA (ÖPNV-On-Demand)	NGT TAXI (Schiene)
 <p>Quelle: DLR</p> <p>Das modulare Fahrzeugkonzept U-Shift und das Projekt IMoGer (Straße) stehen für modulare, hoch auslastungsorientierte Fahrzeug- und Betriebskonzepte. Sie koppeln ÖPNV-Angebote und (mitgedachte) Logistik, wodurch Synergien entstehen.^{15,16,17,18}</p>	 <p>Quelle: Deutsche Bahn</p> <p>KIRA (ÖPNV-On-Demand) adressiert den Betrieb, die Prozesse und die Nutzerperspektive autonomer On-Demand-Verkehre.^{19,20}</p>	 <p>Quelle: DLR</p> <p>Das NGT TAXI (Schiene) konzipiert die das Anwendungsfeld Schiene in der Fläche“ neu, um Nebenstrecken mit geringerer Nachfrage zu bedienen.²¹</p>

Beispiel: Automatisiertes Rufbussystem im Landkreis Ludwigslust-Parchim

Der Landkreis Ludwigslust-Parchim mit seiner Verkehrsgesellschaft VLP demonstriert vorbildhaft, wie die Automatisierung die Mobilität in ländlichen Regionen transformieren kann. Der sehr dünn besiedelte Landkreis ist vollständig mit Rufbuslinien durchzogen, die auch zeitliche Randlagen bedienen. Reisende können eine Stunde bis eine Woche vor Fahrtbeginn Fahrten buchen. Angefahren werden nur die benötigten Haltestellen. Das qualitativ hochwertige Angebot ist beliebt, aber es können nicht alle Anfragen erfüllt werden. Ungefähr 1/3 der Anfragen werden nicht erfüllt. Aus diesem Grund und um in Zukunft Fahrpersonalkosten einsparen zu können, werden nach und nach Rufbuslinien automatisiert.

Mit solchen Angeboten können durchgängige Reiseketten geschaffen werden, die eine Anbindung an einen bedarfsorientierten, hochautomatisierten Schienenverkehr sicherstellen.

¹⁵ Münster, M., Siefkes, T., Brost, M., Hahn, R., Kopp, G., & Schmid, S. (2021). U-Shift vehicle concept: Modular on the road. In Proceedings of the 21st Internationale Stuttgarter Symposium Automobil- und Motorentechnik (Vol. 7). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-658-33466-6_23.

¹⁶ Osebek, M., Scheibe, S., Münster, M., & Siefkes, T. (2024). Evolution and safety concept of the modular U-Shift vehicle for sustainable mobility of people and goods. In Lecture Notes in Mobility. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-85578-8_75.

¹⁷ DLR – Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt. (n.d.). U-Shift. Abgerufen am 20. Januar 2026, von <https://www.dlr.de/en/fk/research-and-transfer/projects/global-projects/u-shift>.

¹⁸ DLR – Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt. (n.d.). IMoGer – Innovative modular mobility made in Germany. Abgerufen am 20. Januar 2026, von <https://www.dlr.de/en/ki/research-transfer/projects/imoger>.

¹⁹ DLR – Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt. (2025, 28. Mai). Autonomes Fahren im ÖPNV: Projekt KIRA startet mit Testnutzerinnen und -nutzern. <https://www.dlr.de/de/ts/aktuelles/nachrichten/2025/autonomes-fahren-im-oepnv-projekt-kira-startet-mit-testnutzerinnen-und-nutzern>.

²⁰ DLR – Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt. (n.d.). KIRA – KI-basierter Regelbetrieb autonomer On-Demand-Verkehr. Abgerufen am 20. Januar 2026, von <https://www.dlr.de/de/ts/forschung-und-transfer/projekte/kira>.

²¹ DLR – Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt. (n.d.). NGT TAXI. Abgerufen am 20. Januar 2026, von <https://www.dlr.de/en/fk/research-and-transfer/projects/global-projects/ngt-taxi>.

In den drei Beispielen wird gezeigt, dass Automatisierung nicht als isolierte Innovation, sondern als integraler Bestandteil einer Systemarchitektur und integrierter Betriebskonzepte betrachtet werden muss. Dadurch kann der Nutzen von autonomen und auf Abruf basierenden Systemen maximiert werden.

Innerhalb der soeben beschriebenen Transferpfade kommen auch Lösungen aus dem Bereich der Teleoperation zu Anwendung, welche sowohl auf der Straßen- und der Schienenseite mit der Automatisierung an sich einhergehen. Die Teleoperation wurde zunächst im Kontext des automatisierten Fahrens auf Schiene und Straße als Forschungs- und Entwicklungsthema relevant – vorgesehen als unverzichtbare Kontroll-, Interventions- und Rückfallebene zur Behebung von Störungen und Ausnahmesituationen und als Absicherung automatisierter Betriebsformen. Ein zentraler Baustein für autonome Fahrfunktionen in Deutschland ist die Technische Aufsicht. Diese Rolle ist für den Straßenverkehr und die Integration autonomer Fahrfunktionen im Betrieb in festgelegten Betriebsbereichen gesetzlich verankert (StVG²² § 1d; AFGBV²³ § 13).

Auch im Schienenverkehr wird die Teleoperation als potenzielle Lösung für den Regelbetrieb diskutiert. Diese Entwicklung ist vor allem durch die Erwartung von Effizienz- als auch Sicherheitsgewinnen in bestimmten betrieblichen Anwendungsfällen begründet. Effizienzpotenziale ergeben sich u.a. durch den Wegfall zeitaufwändiger Fußwege zwischen einzelnen Fahrzeugen oder Einsatzorten, während Sicherheitsgewinne unter anderem aus der Reduktion von Gefährdungen resultieren, die mit dem Aufenthalt von Personal in betrieblich komplexen und potenziell gefährlichen Bereichen wie Rangierbahnhöfen verbunden sind.^{24, 25} Damit wird Teleoperation bzw. Remote-Assistenz zum Skalierungsfaktor: Sie kann Akzeptanz und Sicherheit stärken (Sicherheitsnetz), kann aber auch zum neuen Personal-Engpass werden, wenn sie nicht skalierbar organisiert ist.

Auch die DB-Regio-Studie weist darauf hin, dass autonome Systeme zwar Fahrpersonalkosten reduzieren, aber neue Aufwände entstehen (u.a. Flottenüberwachung, Technische Aufsicht sowie Lizenz- und Cloud-Kosten). Gleichzeitig beschreibt sie für 2045 Skalierungsannahmen, nach denen Mitarbeitende in der Technischen Aufsicht bei großflächig organisierten Flotten perspektivisch sehr viele Fahrzeuge gleichzeitig betreuen könnten. Aus Forschungs- und Implementierungssicht folgt: Human-Factors-Fragen (Arbeitslast, HMI-Design, Situation Awareness), Prozessdesign und Netz- bzw. Latenzanforderungen werden zu Schlüsselfeldern. EU-Programme adressieren Teleoperation zudem explizit als Enabler für SAE-4-Betrieb.²⁶

Mit Blick auf die Umsetzung von Teleoperationssystemen besteht eine Reihe offener Fragen, die alle Ebenen der Systemgestaltung betreffen. Auf technischer Ebene stellen sich unter anderem Fragen zur Auslegung und Absicherung der Kommunikationstechnik, insbesondere im Hinblick auf Verfügbarkeit, Latenz und Redundanz. Eng damit verknüpft sind Gestaltungsfragen der Mensch-Technik-Schnittstellen, die gewährleisten müssen, dass Teleoperatoren auch unter variierenden Betriebs- und Störbedingungen ein hinreichendes Situationsbewusstsein aufrechterhalten und sicherheitsrelevante Entscheidungen zuverlässig treffen können.^{27, 28, 29} Fragen zur betrieblichen und Organisationsgestaltung betreffen insbesondere den Zuschnitt von Prozessen, Aufgaben und Verantwortungsbereichen sowie die Definition neuer oder veränderter Berufsrollen und die Ausgestaltung von Kooperations- und Übergabeprozessen. Die Gestaltungsentscheidungen auf dieser Ebene beeinflussen die

²² Bundesministerium der Justiz. (n.d.). Straßenverkehrsgesetz (StVG) (Gesetze im Internet). Abgerufen am 20. Januar 2026, von <https://www.gesetze-im-internet.de/stvg/>.

²³ Bundesministerium der Justiz. (n.d.). Verordnung zur Genehmigung und zum Betrieb von Kraftfahrzeugen mit autonomer Fahrfunktion in festgelegten Betriebsbereichen (AFGBV) (Gesetze im Internet). Abgerufen am 20. Januar 2026, von <https://www.gesetze-im-internet.de/afgbv/>.

²⁴ Dreßler, Annika; Rappo, Beat; Wyss, Benjamin; Nguyen, D.; Brandenburger, Niels; & Petersen, Malte (2025). Mensch und Technik in der Zugfernsteuerung: ein Pilottest im Rangierbetrieb. Human and technology in remote train operations: A pilot test in shunting operations. 0037-4997 SIGNAL+DRAHT, 40–48. <https://doi.org/10.61067/251051>. Verfügbar unter <https://elib.dlr.de/217599/>.

²⁵ Dreßler, A., Brandenburger, N., Petersen, M. & König, A. (2025). HTO Analysis on Remote Shunting Operations. Final report within the framework of SBB Demonstrator Remote Driving. <https://doi.org/10.82505/R47-2C11>.

²⁶ Hi-Drive. (2023). Teleoperation as a key enabler for connected and automated vehicles (CAV, SAE 4) (Showcase flyer, PDF). https://www.hi-drive.eu/app/uploads/2023/04/Hi-Drive_ShowcaseFlyer_DLR-1.pdf.

²⁷ Bekehermes, Tobias; Arslan, Bekir & Naumann, Anja. (2025). ARTE: Erprobung von ATO GoA 3/4 und RTO auf einer Strecke ohne ETCS. ARTE: Testing ATO GoA 3/4 and RTO on a non-ETCS line. SIGNAL + DRAHT, (117 (10/25)). <https://doi.org/10.61067/251052> Verfügbar unter: <https://elib.dlr.de/219578/>.

²⁸ Brandenburger, Niels; Bier, Igor; Busse, Martin; Gärtner, J. & Melzer, T. (2023). A technical demonstration of remote train operations using 5G mobile communications. SIGNAL + DRAHT, (6), 34–40. Verfügbar unter: <https://elib.dlr.de/195802/>.

²⁹ Brandenburger, Niels; Petersen, Malte & Quante, Laura (2025). Human Factors Contributions Along System Development Phases: The Remote Train Operator Workstation in Project ATO-CARGO. Poster at the International Human Factors Rail Conference 2025, London, United Kingdom. Verfügbar unter: <https://elib.dlr.de/217532/>.

Leistungsfähigkeit des Systems, vermittelt über mentale Beanspruchung und Situationsbewusstsein, Arbeitszufriedenheit, Gesundheit und Fluktuation bei den Operateuren.^{30;31,32}

Somit sind auch die Überlegungen hinsichtlich verbesserten und vor allem kostenreduzierenden Rückfallebenen in den nächsten Jahren zu erproben und in den kommerziellen Betrieb zu überführen, um den Ausbau der Mobilität durch den ÖPNV aktiv mitzugestalten.



Teleoperation sowohl im Straßen- als auch im Schienenverkehr nicht nur als Rückfallebene, sondern auch als potenzielle Lösung für den Regelbetrieb (Quelle: DLR)

³⁰ Brandenburger, Niels; Naumann, Anja; & Jipp, Meike. (2019). Task-induced fatigue when implementing high grades of railway automation. *Cognition, Technology & Work*, 23(2), 273–283. <https://doi.org/10.1007/s10111-019-00613-z>.

³¹ Schnücker, Gina; Quante, Laura; Voss, C. (2025). Perceived risks and benefits of automation in heavy rail: A multistakeholder perspective. Poster at the 8th International Human Factors Rail Conference, 2025, London. Verfügbar unter: <https://elib.dlr.de/218780/>.

³² Thomas-Friedrich, B., Dreßler, A., Quante, L., Schöne, S., Leich, A., Mönsters, M. Teleoperation als Ergänzung für den automatisierten Bahnbetrieb (ATO): Rahmenbedingungen und menschenzentrierte Gestaltung. *Berichte des Deutschen Zentrums für Schienenverkehrsforschung*. Bericht 68 (2025). Verfügbar unter: https://www.dzsf.bund.de/SharedDocs/Standardartikel/DZSF/Projekte/Projekt_126_Teleoperation.html.

Betriebsökonomisches Potential für automatisierte ÖPNV-Systeme

Hochautomatisierte Fahrzeuge können den Betreibern im ÖPNV Fahrpersonalkosten einsparen. Die folgende Tabelle zeigt Durchschnittswerte im Schienenpersonennahverkehr (SPNV) auf Nebenstrecken und des On-Demand-Verkehrs (ODV) auf der Straße (ÖSPV) im ländlichen Raum, die mittels Simulationsmodellen erzeugt wurden. Die Infrastrukturkosten sind bei dieser Betrachtung nicht berücksichtigt. Es werden die Fahrzeugkosten (inklusive Personal) und die Fahrpersonalkosten im Einzelnen aufgezeigt. Neben den Kosten je gefahrenem Fahrzeugkilometer werden die Kosten je erbrachter Verkehrsleistung in Personenkilometer (Pkm) dargestellt:

Kosten	SPNV	ODV ÖSPV
Fahrzeugkosten inkl. Personal [€/Fzgkm]	3,60	1,30
Fahrzeugkosten inkl. Personal [€/Pkm]	0,30	1,00
Fahrpersonalkosten [€/Fzgkm]	1,20	0,90
Fahrpersonalkosten [€/Pkm]	0,09	0,70

Im On-Demand Verkehr auf der Straße verursachen die Fahrpersonalkosten ca. zwei Drittel der Fahrzeuggesamtkosten. Die Fahrzeugkosten je Fahrzeugkilometer sind aufgrund der kleinen Fahrzeuggröße auf der Straße knapp ein Drittel geringer im Vergleich zu denen im Schienenverkehr. Die Kosten je Personenkilometer zeigen im On-Demand Verkehr auf der Straße deutlich höhere Werte als im SPNV. Es ist zu berücksichtigen, dass diese Werte Durchschnittswerte sind und aufgrund der Abhängigkeit von der Nachfragestruktur und der erbrachten Angebotsqualität stark variieren.³³

Auf der Schiene liegen im Nebenstreckenbereich die Kosten für die Triebfahrzeugführenden (Tf) bei ca. 1,20 € je Fahrzeugkilometer und ca. 0,09 € je Personenkilometer. Dies gilt sowohl für Bestandsstrecken als auch für mögliche Streckenreaktivierungen und entspricht einem Anteil von ungefähr einem Drittel der Fahrzeuggesamtkosten. Bei kleineren Fahrzeugen (z.B. Schienenbus DLR NGT-TAXI, Aachener Rail Shuttle) ist der Anteil tendenziell höher als bei größeren konventionellen Fahrzeugen. Das maximale Kosteneinsparpotenzial durch Automatisierung liegt bei ca. 33%.³⁴ Die genannten Kenngrößen schätzen die möglichen Einsparungen im Betrieb ab. Ohne die einmaligen Kosten für die Automatisierung des Tf könnte das Angebot um knapp ein Drittel erhöht werden. Diesem Potenzial sind jedoch die Investitionen in die Automatisierungstechnik und entsprechende Transferkosten (Umschulungen, Prozessanpassungen, etc.) gegenüberzustellen, für die es derzeit noch keine Anhaltswerte gibt. Bei der Automatisierung im Schienenverkehr werden nicht alle Aufgaben, die derzeit vom Tf ausgeführt werden, vollkommen ersetzt werden können, weil z.B. Teile der Zugvorbereitung, Überwachung und ggf. Steuerung durch einen Remote Operator oder Fachpersonal übernommen werden müssen. Aus einem Fallbeispiel in Niedersachsen³⁵ konnte abgeleitet werden, dass je nach Umfang des Bereiches, der durch eine Remote Operation bei einer Fernüberwachung und im Bedarfsfall Steuerung abgedeckt werden kann, 5 bis 10 % der ursprünglichen Personalkosten des Tf bestehen bleiben.

Hat die Erhöhung von Zugfahrten keine unmittelbaren Auswirkungen auf die Infrastruktur, können die eingesparten Kosten für die Tf in die Erhöhung des Zugangebots verwendet werden. Auswirkungen auf die Infrastrukturseite könnten erhöhte Instandhaltung der Infrastruktur sein oder notwendige Investitionen, um ein höheres Angebot umsetzen zu können (z.B. zusätzliche Kreuzungsbahnhöfe bei eingleisigen Strecken). Werden Vollkosten für die Gleisinfrastruktur mit einbezogen, liegt der Anteil der entfallenden Personalkosten für den Tf bei ungefähr 10 % der Gesamtkosten. In Bezug auf das Nutzen-Kosten-Verhältnis unterschiedlicher Automatisierungsgrade konnte festgestellt werden, dass das Nutzen-Kostenverhältnis von GoA 2 auf GoA 3 (nur Zugbegleitung an Board) um ca. 15 % steigt. Durch GoA 4 (Vollautomatisierung) wird das Nutzen-Kosten-Verhältnis ebenfalls verbessert, jedoch nicht so stark wie GoA 2, da die notwendigen Investitionen erheblich sind.³⁶

³³ Scheier, Benedikt und Kurt, Filiz und David, Evnika und John, Tim Ole (2023) Analyse von On-Demand ÖPNV als Bahnhofszubringerverkehr im urbanen und ländlichen Raum. In: Towards the New Normal in Mobility - technische und betriebswirtschaftliche Aspekte Springer Gabler. Seiten 475-486. doi: 10.1007/978-3-658-39438-7_28. ISBN 978-3-658-39437-0.

³⁴ Benedikt Hertel, Evnika David, Johannes Pagenkopf, Benedikt Scheier, Christoph Streuling, Cost-benefit analysis methodology for new rail vehicle concepts with alternative powertrain systems, Transportation Engineering, Volume 23, 2026, 100422, ISSN 2666-691X, <https://doi.org/10.1016/j.treng.2026.100422>.

³⁵ Hofstädter, Raphael; Meirich, Christian; Naumann, Anja; Adebahr, Frederik-Alexander; Kapp, Bettina (2025) Automatisiert fahrende Regionalzüge in Niedersachsen (ARTE). Projektbericht. <https://oa.tib.eu/renate/handle/123456789/19000>.

³⁶ Civity, DLR, Automatisierter Bahnbetrieb, Eine system-ökonomische Betrachtung von Anwendungsfällen im Vollbahn-Bereich, DLR-Symposium „Der Zug zur Digitalisierung“, 04. November 2020, https://event.dlr.de/wp-content/uploads/2020/11/ZzD2020-Vortrag_Zschoche.pdf.

Sozio-ökonomische Effekte

Die Modernisierung des Schienenverkehrs sowie die gezielte Reaktivierung von Strecken bilden zentrale Elemente für ein zukunftssicheres, effizientes Mobilitätssystem in den Regionen. In diesem Abschnitt werden ökonomische Wirkmechanismen dargestellt, die über die Effekte hinausgehen, die in einer Nutzen-Kosten-Analyse im engeren Sinne bilanziert werden.³⁷

Mehrwert des ÖPNV und Netzwerkeffekte

Ein gut ausgebauter ÖPNV stärkt Regionen und bewirkt tiefgreifende wirtschaftliche Effekte. Verbesserungen des ÖPNV-Angebots dürfen ökonomisch dabei nicht isoliert betrachtet werden, da sie über die unmittelbare Wirkung hinausgehende Effekte haben. Ein wesentlicher Faktor dafür sind positive Netzwerkeffekte, welche vereinfacht das Phänomen beschreiben, dass ein Angebot für jede einzelne Person wertvoller wird, je mehr Teilnehmende oder Orte daran angeschlossen sind. Im Schienenverkehr bedeutet das: Jede neue Haltestelle und jede reaktivierte Strecke erhöhen die Anzahl der möglichen Start-Ziel-Verbindungen für alle Fahrgäste im gesamten Netz.³⁸

Netzwerkeffekte finden daher räumlich gesehen auf zwei Ebenen statt. Im lokalen Umfeld erhöht ein ausgebauter ÖPNV die Erreichbarkeit der nächstgelegenen zentralen Orte. Dadurch steigt die Attraktivität des Wohnens in den so erschlossenen peripheren Orten, da nun hochwertige Arbeitsplätze in den zentralen Orten besser erreichbar sind. Außerdem ermöglicht eine bessere Erreichbarkeit zentraler Orte die Teilhabe der Bewohnerinnen und Bewohner peripherer Gebiete an den weiteren Möglichkeiten, die am Wohnort nicht gegeben sind.

Ökonomische Wirkungskategorien im Hinblick auf den ÖPNV

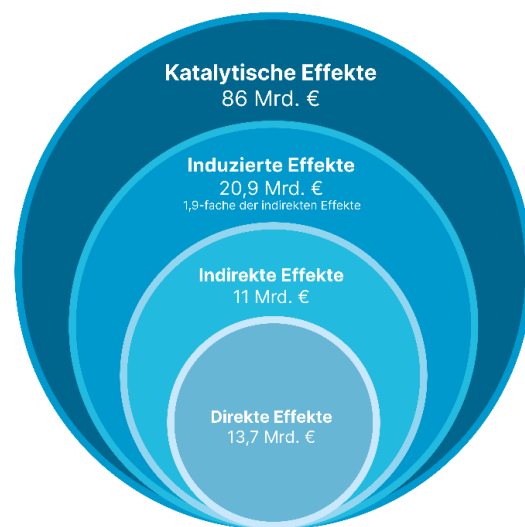
Eine umfassende Bewertung des Nutzens der Schiene erfordert eine Erweiterung der ökonomischen Betrachtung auf vier Ebenen, die über die direkten Fahrgeldeinnahmen hinausgehen.^{39,40,41}

Ebene 1 – Direkte Effekte: Die direkten Effekte resultieren unmittelbar aus der Bruttowertschöpfung der beteiligten Akteure – den Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) und den Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU). Diese berechnen sich aus dem erzielten Umsatz abzüglich der bezogenen Vorleistungen.

Ebene 2 – Indirekte Effekte: Die indirekten Effekte entstehen durch den Bezug von Vorleistungen entlang der Zulieferkette, etwa in der Produktion von rollendem Material, Schienentechnik und Bauleistungen. Zudem fördern durch Verkehrsverbünde und Aufgabenträger gesteuerte wettbewerbliche Vergabeverfahren den Markteintritt regionaler Verkehrsunternehmen und stärken so die lokale Wertschöpfung.

Ebene 3 – Induzierte Effekte: Induzierte Effekte entstehen, wenn Beschäftigte und Kapitalgeber der beteiligten Unternehmen ihre Einkommen wieder in den Wirtschaftskreislauf einspeisen. Die Reaktivierung einer Strecke fungiert somit als Impulsgeber für die lokale Kaufkraft, insbesondere in ländlichen Räumen.

Ebene 4 – Katalytische Effekte: Katalytische Effekte beschreiben die langfristigen strukturellen Veränderungen einer Region durch verbesserte Erreichbarkeit und weisen somit entsprechende Standortvorteile aus. Innovationen und die Innovationstätigkeit werden gefördert⁴², die Mobilitätsoptionen für die Bevölkerung steigen, mit



Ökonomische Wirkungskategorien für den ÖPNV und monetarisierte Stärke der wirtschaftlichen Auswirkungen (Eigene Darstellung aus ^{44, 45, 46})

³⁷ Liedtke, Gernot, et al. Leitfaden zur Entscheidungsfindung und Bewertung von Maßnahmen und Technologien im Verkehr. DLR, 2020. <https://elib.dlr.de/140664/>.

³⁸ Corinne Blanquart, Chia-Lin Chen, José Maria de Urena, Marie Delaplace, Pascal Gastineau, et al.. The wider economic impacts of transportation infrastructure: Task Force 3 - Infrastructure investment and financing. 2020, 19p. (hal-03111802).

³⁹ MCube (2025): Wertschöpfung ÖPNV, Abschlussbericht im Auftrag der Initiative Zukunft Nahverkehr (ZNV).

⁴⁰ Infrast & DIW (2024): Gesamtwirtschaftliche Bedeutung des deutschen Bahnsektors auf Grundlage der Investitionstätigkeit, Berichte des Deutschen Zentrums für Schienenverkehrsforschung, Nr. 62 Projektnummer 2022-17-W-1202.

⁴¹ Conoscope (2024): Die nachhaltige Mobilitätswirtschaft: Ein Wirtschaftsfaktor für Deutschland Analyse der volkswirtschaftlichen Effekte der Unternehmen der nachhaltigen Mobilitätswirtschaft in Deutschland, Ergebniszusammenfassung, April 2024.

⁴² Bandelow. L.A.M (2023): The Role of Congestion-impacted Accessibilities for Innovation and Entrepreneurship, Dissertation, TUM School of Management.

Folgen für die Inklusion, die städtebauliche Aufwertung und die Vernetzung der Räume insgesamt ⁴³, dazu kommt gesteigerte Wertschöpfung in Branchen wie dem Tourismus, dem Einzelhandel und dem Immobilien- und Arbeitsmarkt.

Neue Potenziale für die Reaktivierung von Schienenstrecken

In der aktuellen verkehrspolitischen Debatte in Deutschland spielt auch die Reaktivierung stillgelegter Schienenstrecken eine wichtige Rolle. Häufig wird diese unter dem Aspekt der Kostenintensität diskutiert, mit dem Problem, dass die Reaktivierung nicht durchgeführt wird. Denn das etablierte Verfahren der Standardisierten Bewertung – als spezifische Ausprägung der Nutzen-Kosten-Analyse (NKA) – fokussiert primär auf Reisezeitgewinne, wodurch systemische Potenziale oft unterrepräsentiert bleiben. Übersehen wird damit jedoch, dass auch die Reaktivierung von Schienenwegen darüberhinausgehende Netzwerkeffekte generiert. Auch kann sie den Druck auf den Wohnungsmarkt verringern, indem sie das Pendeln vereinfacht.

Neben ihrem lokalen Nutzen hat eine reaktivierte Strecke auch eine Funktion als Zubringer für das Gesamtnetz und erhöht damit den Nutzwert des Gesamtsystems. Weiterhin bedingt die Schließung von Lücken im Verkehrsnetz Skaleneffekte und sie erhöht die Resilienz und Effizienz des gesamten Mobilitätssystems (siehe vorherige Abbildung).

In Zukunft werden die in den vorangegangenen Kapiteln skizzierten Entwicklungen auf den Feldern der Automatisierung und Digitalisierung weitere Effizienzpotenziale bieten. Damit werden sie die ökonomische Tragfähigkeit von Reaktivierungsprojekten weiter steigern.

Technologische Transformation und regulatorische Barrieren aus sozio-ökonomischer Sicht

Die Automatisierung des Schienenverkehrs (ATO) bietet Möglichkeiten zur Optimierung der Betriebskosten. Sinkende Grenzkosten machen einen dichten Takt (15-Minuten-Rhythmus) wirtschaftlich darstellbar. Konzepte wie das DLR NGT TAXI ermöglichen zudem eine bedarfsgerechtere Bedienung auf der Schiene. Die Realisierung dieser Potenziale wird jedoch derzeit durch regulatorische Fehlanreize aus sozio-ökonomischer Sicht gehemmt:

- **Trassenpreissysteme:** Aktuelle Regulierungen führen dazu, dass automatisierte Leichtfahrzeuge oft ähnliche Trassengebühren entrichten müssen wie schwere Güterzüge. Da diese Gebühren nicht nach Gewichtsklassen oder tatsächlichem Verschleiß differenzieren, entsteht eine ökonomische Eintrittsbarriere für innovative Kleinfahrzeuge.
- **Starre Erschließungsstandards:** Regulatorische Vorgaben zu Haltestellenabständen (oft orientiert an 500-m-Einzugsbereichen) und starre Sicherheitsanforderungen der EBO (Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung) verhindern oft kosteneffiziente, schlanke Lösungen für automatisierte Shuttles.
- **Demonstrationsprojekte als Lösungsansatz:** Um diese "Hemmschuhe" zu überwinden, ist die Einrichtung von Reallaboren notwendig. In solchen Demonstrationsprojekten könnten durch Experimentierklauseln unnötige Regulierungen temporär ausgehebelt werden, um die tatsächliche Leistungsfähigkeit automatisierter Schienenkonzepte unter realen Bedingungen nachzuweisen.

Beispiel: Die Schönbuchbahn

Empirische Fallbeispiele belegen die Existenz dieser Effekte, die sich insbesondere an reaktivierten Strecken gut analysieren lassen. Ein Referenzprojekt ist die Schönbuchbahn (Böblingen–Dettenhausen), deren Infrastruktur 1993 für einen symbolischen Preis von einer DM von der Deutschen Bundesbahn übernommen wurde. Nach der Wiedereröffnung im Dezember 1996 übertrafen die Fahrgastzahlen mit über 5.000 Personen pro Werktag (1997) die ursprüngliche Prognose von 2.500 Nutzern um 100 %. Infolge des kontinuierlichen Zuspruchs auf über 8.000 Fahrgäste pro Werktag wurde die Strecke umfassend modernisiert. Zu den Maßnahmen zählten die Elektrifizierung der 17 km langen Trasse, die Einrichtung von Zweigleisabschnitten für einen 15-Minuten-Takt zwischen Böblingen und Holzgerlingen sowie die Erhöhung der Streckengeschwindigkeit auf bis zu 100 km/h. ⁴⁹ Diese Entwicklung induzierte signifikante bauliche Erweiterungen in den Anliegergemeinden, die heute als bedeutende Wohnstandorte im Verdichtungsraum Stuttgart fungieren.

⁴³ BBSR (2022): Räumliche Effekte reaktivierter Schienenstrecken im ländlichen Raum, BBSR-Online-Publikation 27/2022.

⁴⁴ Brauer, T. (2017). Die Schönbuchbahn. Von der Nebenbahn zum S-Bahn-Standard. *Zeitschrift für Angewandte Geographie*, 41(3), 224–228. <https://doi.org/10.1007/s00548-017-0499-4>.

Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen

Zusammenfassend kann geschlussfolgert werden, dass die Automatisierung der Schiene als Ergänzung zur Straße die Abhängigkeit vom Fahrpersonal reduziert, die Fahrtenverfügbarkeit erhöht und ein flexibleres, bedarfsorientiertes Angebot schafft, welches geringere Reisezeiten in Reiseketten ermöglicht. Die Automatisierung bietet weiter die Chancen auch aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten das Angebot zu erhöhen. Zudem fördert ein kostengünstiger, automatisierter Betrieb die Reaktivierung von Eisenbahnstrecken, was auch Redundanzen realisiert und so die Resilienz des ÖPNV-Systems nachhaltig steigert.

Die mögliche Reaktivierung von Schienenstrecken in Verbindung mit automatisiertem Betrieb stellt eine Investition in die infrastrukturelle Zukunftsfähigkeit dar. Unter Berücksichtigung der direkten, indirekten, induzierten und katalytischen Effekte – von der Innovationsförderung bis hin zu Agglomerationsvorteilen – wird die Schiene als zentrale Säule regionaler Wirtschaftsentwicklung erkennbar.

Das DLR empfiehlt nachfolgende Handlungsempfehlungen, die eine Umsetzung zielgerichtet ermöglichen:

- In Anbetracht der technologischen Entwicklungen im Verkehrssektor und des dringenden Bedarfs an nachhaltigen Mobilitätslösungen sollte eine gezielte Integration von automatisierten Schienenpersonenverkehrssystemen (SPNV) als Ergänzung zu den bereits laufenden Projekten des automatisierten Straßenverkehrs erfolgen. Dies kann zunächst in einem speziell ausgestatteten Testfeld sowie in einer ausgewählten Modellregion als Reallabor erprobt und betrieben werden, um sowohl die technischen als auch die betriebswirtschaftlichen Parameter unter realen Bedingungen zu validieren.
- Die Realisierung eines On-Demand-Schienen taxis in einer ausgewählten Region, das flexibel die Nachfrage auch bei starker zeitlicher Streuung und in Randzeigen bedient, bietet die Möglichkeit, den Servicegrad des öffentlichen Nahverkehrs erheblich zu erhöhen. Durch den Einsatz modular aufgebauter, leichter Fahrzeugkonzepte, die sich entsprechend an die jeweiligen Einsatzbedingungen anpassen lassen, kann die Nachfrage in ländlichen Regionen bedient werden, was sowohl die Auslastung als auch die Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit verbessert.
- Ein Bottom-Up-Ansatz, der zunächst experimentell und modular startet und sukzessive auf einen prototypischen Regelbetrieb ausgebaut wird, ist ratsam. Durch die schrittweise Ausweitung lassen sich technische Risiken und Anpassungsbedarfe frühzeitig erkennen und adressieren, während gleichzeitig ein solides Fundament für die spätere Skalierung gelegt wird.
- Die Analyse und Bewertung der bestehenden Zertifizierungs- und Zulassungsprozesse unter dem Gesichtspunkt einer beschleunigten Zulassung, die die Modularität der Fahrzeuge berücksichtigt, ist ein weiterer entscheidender Aspekt, der im Reallabor untersucht werden kann. Durch die Anpassung von Standards und Prüfverfahren kann die Markteinführung neuer Fahrzeugkonzepte wie leichte Schienenfahrzeuge (Made in Germany) deutlich verkürzt werden.
- Ein Paradigmenwechsel von passiver zu aktiver Sicherheit wird empfohlen, um gemischte Schienenfahrzeugflotten aus leichten und schweren Fahrzeugen sicher betreiben zu können. Durch den Einsatz von Sensorik und KI-gestützten Crash-Vermeidungsmechanismen kann die Sicherheit gewährleistet werden, um die Flexibilität und Effizienz dieses Konzeptes im Rahmen von Systemerprobungen auszuschöpfen.
- Eine integrierte Planung der ÖPNV-Netze unter Verbindung von autonomen Shuttles auf der Straße und dem Schienenverkehr als kapazitives Rückgrat muss unter Berücksichtigung der betroffenen wirtschaftlichen Ökosysteme und Geschäftsmodelle aller Beteiligten erfolgen.
- Transferprojekte sollten gezielt gefördert werden, um die technische Reife (TRL) des automatisierten Verkehrs auf Straße und Schiene weiter zu entwickeln und die notwendigen regulatorischen sowie ökonomischen Rahmenbedingungen zu schaffen. Durch den Austausch bewährter Praktiken, die Weitergabe von Know-How und die Schaffung von Kooperationsplattformen kann die gesamte Branche vorangetrieben werden, sodass Deutschland als Vorreiter in der Digitalisierung des Schienenverkehrs gelten kann.

Durch eine strategische Förderung, die Einrichtung einer entsprechenden Infrastruktur und die Entwicklung von innovativen Fahrzeugkonzepten kann Deutschland seine Mobilität nachhaltig gestalten und seine Wettbewerbsfähigkeit stärken.

Das DLR im Überblick

Das DLR ist das Forschungszentrum der Bundesrepublik Deutschland für Luft- und Raumfahrt. Wir betreiben Forschung und Entwicklung in Luftfahrt, Raumfahrt, Energie und Verkehr, Sicherheit und Digitalisierung. Die Deutsche Raumfahrtagentur im DLR ist im Auftrag der Bundesregierung für die Planung und Umsetzung der deutschen Raumfahrtaktivitäten zuständig. Zwei DLR Projektträger betreuen Förderprogramme und unterstützen den Wissenstransfer.

Global wandeln sich Klima, Mobilität und Technologie. Das DLR nutzt das Know-how seiner 55 Institute und Einrichtungen, um Lösungen für diese Herausforderungen zu entwickeln. Unsere 10.000 Mitarbeitenden haben eine gemeinsame Mission: Wir erforschen Erde und Weltall und entwickeln Technologien für eine nachhaltige Zukunft. So tragen wir dazu bei, den Wissens- und Wirtschaftsstandort Deutschland zu stärken.

Impressum

Herausgeber:

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR)
Institut für Verkehrssystemtechnik, Institut für Verkehrsforschung

Anschrift:

Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig
Rutherfordstr. 2, 12489 Berlin
Prof. Dr. Gert Bikker, E-Mail: gert.bikker@dlr.de
Prof. Dr. Gernot Liedtke, E-Mail: gernot.liedtke@dlr.de

DLR.de

Bilder DLR (CC BY-NC-ND 3.0),
soweit nicht anders angegeben.
Titelbild: Adobe Stock