

Infrastruktursystem Verkehr und Mobilität

Ergebnisse aus dem Resilienz-Radar



Downloadversion
foresight.tab-beim-bundestag.de

Juni 2024
Foresight-Report

Foresight-Report zum Infrastruktursystem Verkehr und Mobilität, Juni 2024, Downloadversion

Die TAB Foresight-Reports fassen die Ergebnisse des Resilienz-Radars zusammen und erscheinen seit 2024 jährlich auf der Microsite <https://foresight.tab-beim-bundestag.de>.

Das [Resilienz-Radar](#) dient der Identifikation und Bewertung von Entwicklungen, die mit systemischen Risiken für kritische Infrastrukturen verbunden sind. Neben der Analyse zentraler Trends liegt der Fokus auf der Einschätzung von systemischen Risiken mit potenziell weitreichenden Auswirkungen, um die Gefährdungslage einzelner Infrastruktursysteme fundiert zu bewerten. Zudem werden jeweils infrastrukturspezifische Fokusthemen vorgeschlagen, die von besonderer Relevanz für eine vertiefende Untersuchung sind. Die Ergebnisse werden jährlich in den Foresight-Reports zusammengefasst.



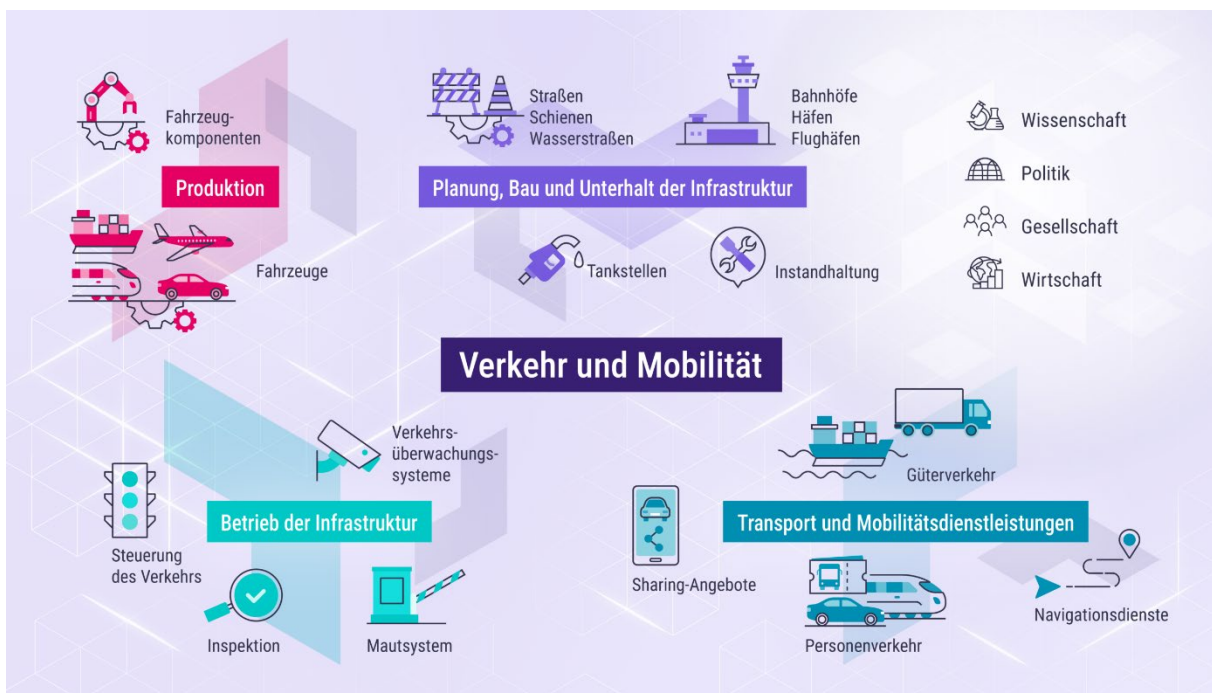
Das TAB analysiert im Auftrag des Deutschen Bundestages umfassend und vorausschauend die Potenziale wissenschaftlich-technischer Entwicklungen und ihre Auswirkungen auf die Gesellschaft.

Inhalt

Infrastruktursystem Verkehr und Mobilität	4
Überblick über aktuelle Trends.....	8
Trendcluster alternative Antriebe	11
Trendcluster Vernetzte Mobilitätslösungen.....	20
Trendcluster Automatisiertes und autonomes Fahren.....	24
Systemische Risiken und ihre Auswirkungen auf das Infrastruktursystem Verkehr und Mobilität.....	30
Status quo der Gefährdungslagen.....	30
Entwicklungsdynamiken ausgewählter systemischer Risiken und Gefährdungslagen.....	37
Gefährdungslagen im Zuge der Transformation.....	43
Fokusthemen	48
Fokusthema 1: Elektrifizierung der Binnenschifffahrt	48
Fokusthema 2: integrierte Mobilitätsdienstleistungen im Personenverkehr	49
Fokusthema 3: Anschlussverkehre durch automatisiertes und autonomes Fahren.....	49
Methodik und Vorgehen	50

Infrastruktursystem Verkehr und Mobilität

Eine funktionsfähige Gesellschaft ist auf ein Verkehrssystem mit ausreichender Kapazität angewiesen. Sowohl für die Versorgung der Bevölkerung mit Energie, Gesundheit und Nahrungsmitteln als auch für eine leistungsfähige Wirtschaft und die individuelle Teilhabe am Arbeits- und Sozialleben ist eine effiziente Beförderung von Personen und Gütern unabdingbar. Um diese Aufgaben erfüllen zu können, braucht es eine intakte, leistungsfähige Verkehrsinfrastruktur, die kontinuierlich bedarfsorientiert weiterentwickelt wird.



Systembild des Infrastruktursystems Verkehr und Mobilität

Der Verkehrssektor steht in klimapolitischer Hinsicht vor besonders hohen Transformationsherausforderungen, da er – mit einem Anteil von rund 20% – zu den größten Verursachern von Treibhausgasemissionen in Deutschland zählt. Soll Deutschland bis 2045 klimaneutral werden, was das Ziel der Bundesregierung ist, müssen – neben zusätzlichen Maßnahmen wie der Verlagerung von Verkehr – fossile Kraftstoffe durch klimaneutrale Alternativen substituiert werden. Gemäß dem Klimaschutzgesetz, das jedoch novelliert werden soll, ist als

Zwischenschritt vorgesehen, dass die verkehrsbedingten Emissionen bis 2030 um 48 % gegenüber 1990 sinken.

Um die Klimaziele zu erreichen, hat sich die Bundesregierung vorgenommen, den Schienenverkehr zu stärken und dessen Verkehrsleistung bis 2030 deutlich zu steigern. Außerdem wurde beschlossen, die Elektrifizierung des motorisierten Individualverkehrs voranzutreiben und die für deren Betrieb erforderliche öffentliche Ladeinfrastruktur auszubauen. Die Preise für fossile Kraftstoffe steigen durch die nationale CO₂-Bepreisung sowie die auf EU-Ebene beschlossene Einführung eines eigenständigen Emissionshandelssystems (ab 2027) für den Straßenverkehr (sowie Gebäude) kontinuierlich an. Auf europäischer Ebene wurde parallel dazu ein Verbot von Verbrennungsmotoren in Neuwagen ab 2035 beschlossen und es wurden die CO₂-Flottenzielwerte für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge verschärft.

Das Infrastruktursystem ist komplex und nicht zuletzt aufgrund der Transformationsbestrebungen einer kontinuierlichen Veränderungsdynamik unterworfen. Dies betrifft sowohl die beteiligten Akteure als auch die Wertschöpfungsstrukturen.

Produktion von Fahrzeugen und Komponenten

Fahrzeuge sind komplexe Industrieprodukte, die in spezifisch auf die verschiedenen Fahrzeugtypen (Pkw, Lkw, Schiffe, Flugzeuge, Fahrräder etc.) ausgerichteten Industrien hergestellt werden. Die Fahrzeugindustrien umfassen die eigentlichen Fahrzeughersteller (z.B. Werften, Automobilhersteller) sowie Zulieferer für einzelne Bauteile. Die Lieferketten, die für die Herstellung benötigt werden, sind in der Regel weltweit verzweigt: Benötigt werden u.a. Komponenten (z.B. Chips, Batterien) und Rohstoffe, die häufig importiert werden müssen.

Planung, Bau und Unterhalt der Infrastruktur

Zur materiellen Verkehrsinfrastruktur gehören die eigentlichen Verkehrswege (Straßen, Schienen, Wasserstraßen), aber auch die für die Sicherheit und Abwicklung des Verkehrs benötigten Elemente wie Bahnhöfe und (Flug-)Häfen, Tankstellen, Beleuchtung, Ampeln, Leit- und Verkehrsüberwachungssysteme. Die gesamte materielle Infrastruktur muss geplant, errichtet und kontinuierlich instandgehalten werden, was u.a. eine leistungsfähige Bauindustrie voraussetzt. Die Verkehrsentwicklungsplanung, also die Formulierung von Zielen und Maßnahmen im Bereich der Verkehrs- und Infrastrukturentwicklung, ist Sache der Kommunen. Zudem können auch immaterielle Komponenten

wie Verkehrsregeln, Verkehrsrecht, Verkehrsüberwachung, Verkehrssteuerung sowie Infrastrukturplanungs- und -managementsysteme zur Verkehrsinfrastruktur gezählt werden. Deren Pflege und Durchsetzung obliegt in der Regel staatlichen Behörden und Vollzugsorganen.

Betrieb der Infrastruktur

Infrastrukturbauwerke und -komponenten wie Ampelanlagen, Weichen, Schleusen sowie auch Umschlagplätze (Bahnhöfen, Flughäfen, Häfen) müssen betrieben werden, damit ihre Funktionsfähigkeit gegeben ist. Dafür werden Personal und eine funktionierende Versorgung mit Energie und Breitbandinternet benötigt.

Transport und Mobilitätsdienstleistungen

Der letzte Schritt beinhaltet den eigentlichen Transport von Gütern (Güterverkehr) und die Beförderung von Personen (Personenverkehr) mithilfe der verschiedenen Transport- und Verkehrsmittel. Dafür zuständig sind entweder private oder öffentliche Anbieter von Mobilitätsdienstleistungen (z.B. kommunale Verkehrsunternehmen), für die wiederum funktionierende Geschäftsmodelle benötigt werden. Viele Geschäftsmodelle vor allem im ÖV werden staatlich subventioniert. Sowohl für die Abwicklung des Güter- als auch Personenverkehrs wird Fach- und Servicepersonal benötigt. Zunehmend wichtig für Mobilitätsdienstleistungen ist außerdem die Verfügbarkeit von satellitenbasierten Navigationssystemen, welche die Grundlage für Echtzeitnavigation bilden.

Kernergebnisse

Drei Trendcluster

prägen gemäß der Trendanalyse derzeit das Infrastruktursystem: alternative Antriebe, vernetzte Mobilitätslösungen sowie automatisiertes und autonomes Fahren.

Aufkommende Technologien

sind u.a. neue Batteriekonzepte, Schiffe mit Windzusatzantrieb, vollintegrierte Mobility-as-a-Service-Angebote sowie autonome Logistiklösungen für die letzte Meile.

Der Status quo der Gefährdungslagen

durch systemische Risiken ist für das Infrastruktursystem Verkehr und Mobilität insgesamt als mittel einzustufen. Die Funktionsfähigkeit und die Stabilität des Infrastruktursystems werden aktuell vor allem durch Wetterextreme und geopolitische Konflikte gefährdet.

Entwicklungsdynamiken

infolge von Klimawandel und fortschreitender Digitalisierung sind besonders ausgeprägt und führen zu einer zunehmenden Gefährdungslage durch Wetterextreme und Cyberkriminalität.

Die Transformation des Verkehrs- und Mobilitätssystems

ist aufgrund langwirkender Pfadabhängigkeiten besonders herausfordernd. Auch die gesellschaftliche Polarisierung in Bezug auf die Umstellung auf nachhaltige Mobilitätsformen kann das Erreichen der Transformationsziele gefährden.

Fokusthemen

Für eine Vertiefung im Rahmen des Resilienz-Check werden folgende Fokusthemen vorgeschlagen: Elektrifizierung der Binnenschifffahrt, integrierte Mobilitätsdienstleistungen im Personenverkehr und Anschlussverkehre durch automatisiertes und autonomes Fahren.

Überblick über aktuelle Trends

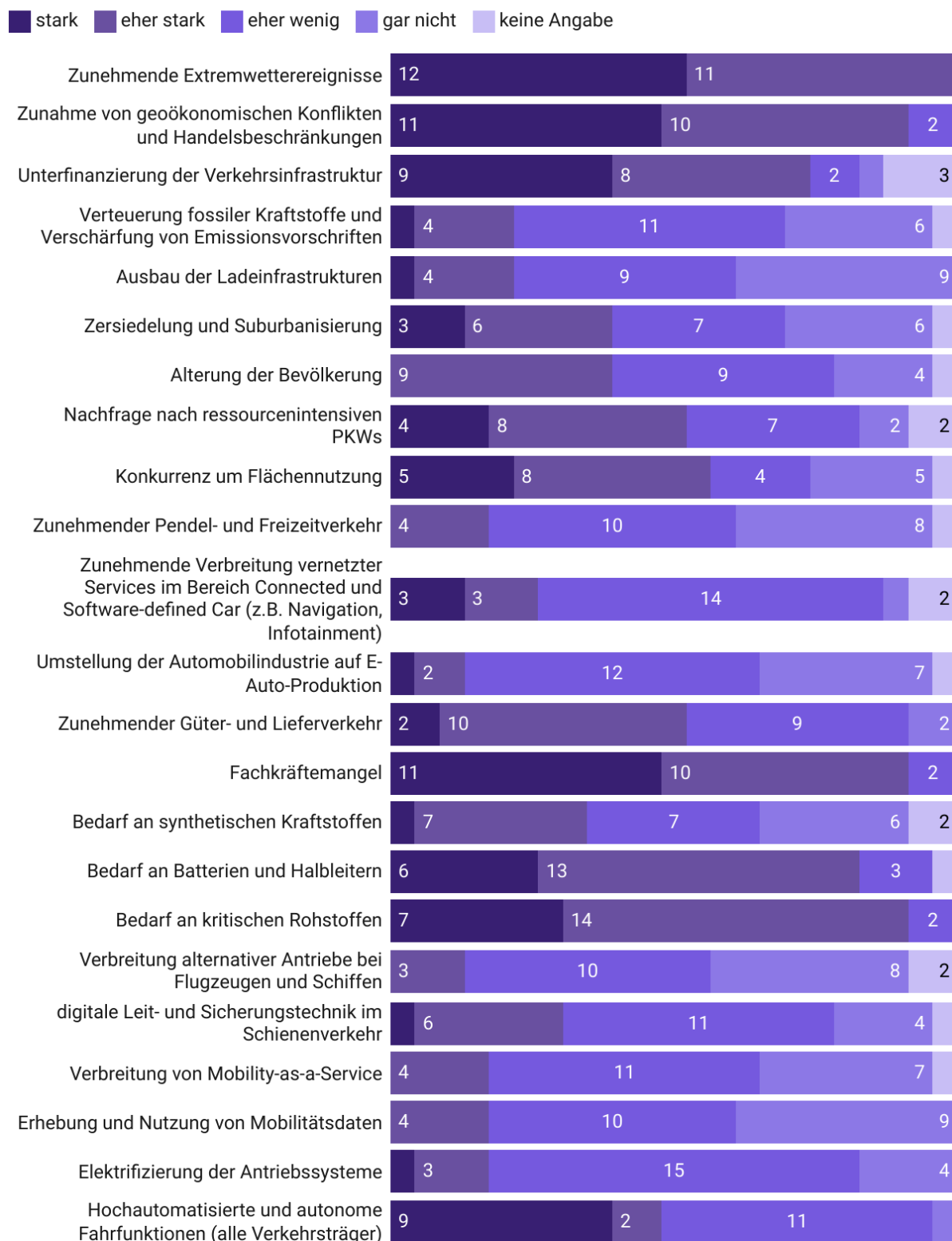
Prägend für das Infrastruktursystem Verkehr und Mobilität waren in den letzten Jahren die Unterfinanzierung der Verkehrsinfrastruktur, zunehmende Schäden durch den fortschreitende Klimawandel und Extremwetterereignisse sowie eine wachsende Verkehrsleistung sowohl im Personen- als auch Güterverkehr – die überproportional auf der Straße abgewickelt wird. Weitere wichtige Trends lassen sich drei Clustern zuordnen: Die Umstellung auf alternative, nichtfossile Antriebe, die zunehmende Verbreitung vernetzter Mobilitätslösungen sowie Entwicklungen im Bereich des automatisierten und autonomen Fahrens.

Der Verkehrssektor trägt rund 20% zu den Treibhausgasemissionen Deutschlands bei und ist damit ein wesentlicher CO₂-Emittent. Seit Jahren ist, bis auf einen kurzen Einbruch während der COVID-19-Pandemie, die [Verkehrsleistung im Personen- und Güterverkehr](#) angestiegen. Im Personenverkehr stieg sie zwischen 1991 und 2019 um fast 34%, im inländischen Güterverkehr um 75% [\[1\]](#). Obwohl politisch beabsichtigt ist, die Verkehrsleistung der Schiene zu steigern, wird sowohl im [Personen-](#) (84,4%) als auch [Güterverkehr](#) (71%) der weitaus größte Anteil auf der Straße abgewickelt ([Datengrafik](#)). Hinzu kommen ein [wachsender PKW-Bestand](#) sowie eine [steigende Nachfrage nach immer ressourcenintensiveren PKW](#) [\[2\]](#). Diese Entwicklungen tragen wesentlich dazu bei, dass der Verkehrssektor die jährlichen Einsparziele bei den CO₂-Emissionen seit Jahren verfehlt.

Gleichzeitig stellt der Klimawandel das Verkehrssystem Deutschlands vor wachsende Herausforderungen, da vor allem die klimawandelbedingt [zunehmenden Extremwetterereignisse](#) – Niedrigwasser infolge von Dürren, Hochwasser und Hangrutschungen – zu einer erhöhten Gefährdung der Verkehrsinfrastruktur beitragen [\[3\]](#). Verstärkend kommt die [Unterfinanzierung der Verkehrsinfrastruktur](#) vor allem im Bereich Straße und Schiene hinzu, die zukünftig durch sinkende Mineralölsteuereinnahmen aufgrund der Verbreitung der E-Mobilität noch zunehmen könnte. Die aktuelle Investitionslücke im Bundesverkehrshaushalt – gemessen am durchschnittlichen Bedarf des Bundesverkehrswegeplanes 2030 – beträgt laut Schätzungen knapp 80 Mrd. Euro (unter Berücksichtigung der Baukostensteigerungen; [\[4\]](#)). Sowohl die zunehmenden Extremwetterereignisse als auch die

Unterfinanzierung der Verkehrsinfrastruktur werden von einer klaren Mehrheit des Expertenpanel als wichtige Vulnerabilitätsfaktoren für das Infrastruktursystem eingeschätzt ([Datengrafik](#)).

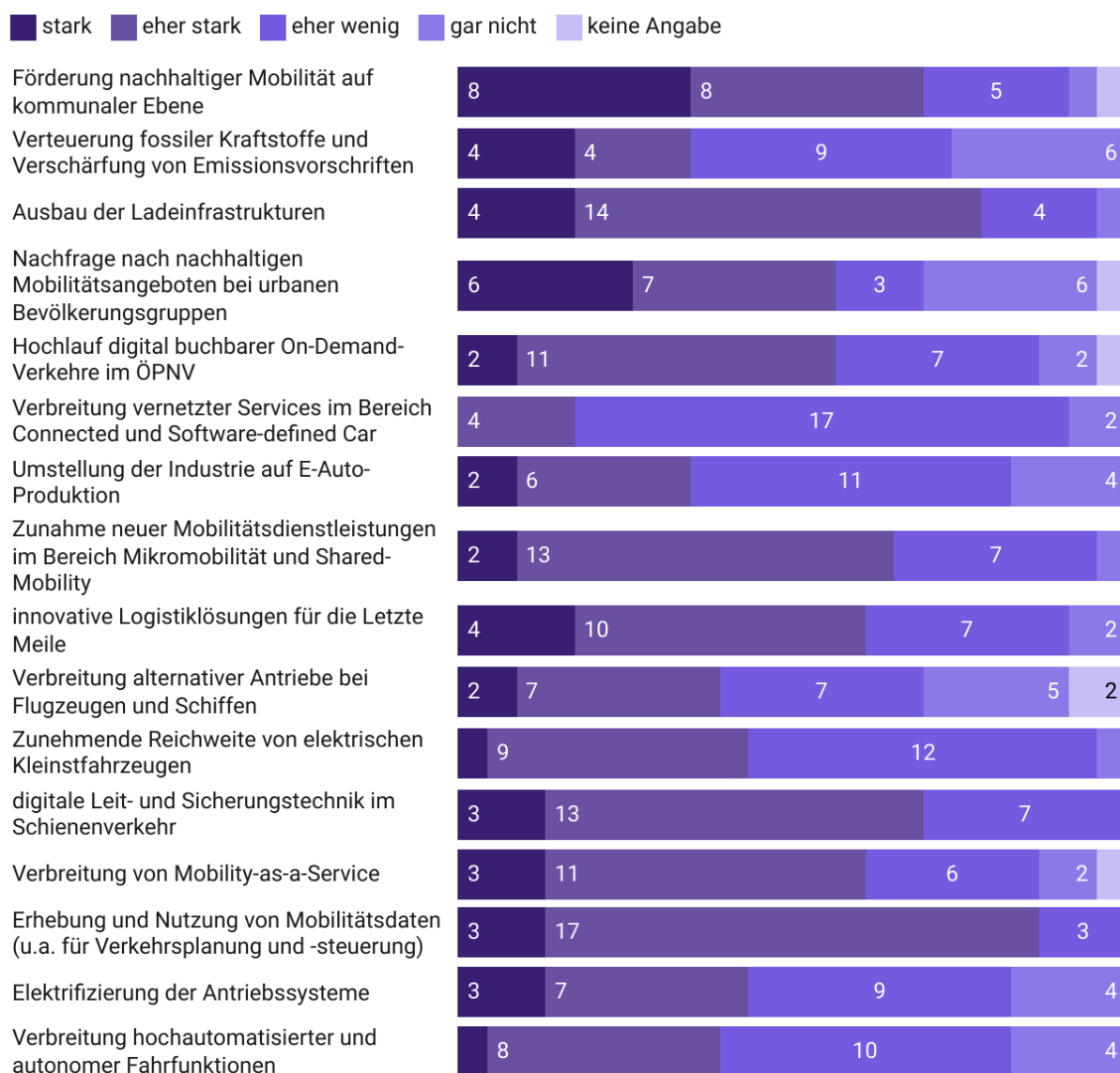
Inwieweit tragen die folgenden Trends aus Ihrer Sicht zu einer erhöhten Verletzlichkeit des Infrastruktursystems Verkehr und Mobilität innerhalb der nächsten zehn Jahre bei?



Expertenbefragung zum Infrastruktursystem Verkehr und Mobilität (n=23)

Quelle: TAB, Resilienz-Radar 2023/24 • Erstellt mit Datawrapper

Inwieweit tragen die folgenden Trends aus Ihrer Sicht zu einer erhöhten Resilienz des Infrastruktursystems Verkehr und Mobilität innerhalb der nächsten zehn Jahre bei?



Expertenbefragung zum Infrastruktursystem Verkehr und Mobilität (n=23)

Quelle: TAB, Resilienz-Radar 2023/24 • Erstellt mit Datawrapper

Trendcluster alternative Antriebe

Für eine klimaneutrale Gestaltung des Verkehrs ist vor allem eine Umstellung der mit fossilen Kraftstoffen betriebenen Fahrzeuge auf alternative Antriebe unabdingbar. Die Politik hat verschiedene Maßnahmen ergriffen, um den Verkehr zu dekarbonisieren. Auf EU- und Bundesebene sind dies klimapolitische Instrumente wie z.B. der Emissionshandel, der ab 2024 auch auf den Verkehr ausgeweitet werden soll, sowie eine CO₂-Steuer auf fossile Kraftstoffe.

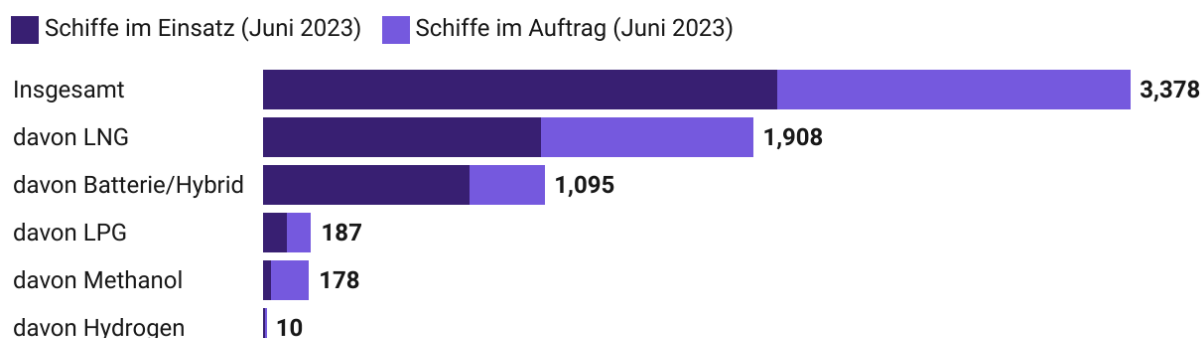
Da das Schienennetz bereits überwiegend [elektrifiziert](#) ist (61% des Streckennetzes und 90% der Verkehrsleistung auf der Schiene [\[1\]](#)), betrifft die Umstellung auf alternative Antriebe primär den Auto- (Pkw und Lkw), Schiffs- und Flugverkehr. Im Pkw-Bereich sind seit Jahren [starke politische Bemühungen zur Förderung der Elektromobilität](#) zu beobachten. Neben der stetigen Verschärfung der Flottengrenzwerte für Pkw und Lkw auf EU-Ebene umfassen die Förderaktivitäten vor allem den [Ausbau der Ladeinfrastruktur](#) mit ausreichender Kapazität und in ausreichender Dichte (die langjährigen Kaufprämien für E-Autos wurden 2024 eingestellt). Die Zahl der öffentlichen Ladestationen nahm von 2017 bis 2023 von rund 9.000 auf über 90.000 zu, wie eine interaktive [Abbildung](#) der Bundesregierung zeigt. Daneben werden auch innovative Ladekonzepte wie beispielsweise induktives oder automatisiertes Laden erforscht. Seit 2019 ist ein deutlicher [Anstieg bei der Anzahl der zugelassenen reinen Elektroautos](#) in Deutschland festzustellen: Von 2022 bis 2023 hat sich deren Zahl von rund 600.000 auf über 1,3 Mio. mehr als verdoppelt [\[2\]](#). Für 2024 wird jedoch mit einem Einbruch bei den Neuzulassungen gerechnet. Ihr Anteil am Pkw-Bestand liegt in Deutschland mit rund 2,1 % aber immer noch in einem sehr niedrigen Bereich [\[3\]](#). Die deutsche Automobilindustrie, die bei den Verbrennerautos weltweit führend ist, ist durch die [Umstellung auf E-Auto-Produktion](#) aktuell einem starken Strukturwandel unterworfen und steht unter großem Konkurrenzdruck vor allem durch chinesische E-Auto-Hersteller, die zunehmend auf den deutschen Markt drängen. 2023 war China erstmals der größte Autoexporteur der Welt, was zum Teil auf den steigenden Absatz von Elektroautos zurückzuführen ist [\[4\]](#).

Auf kommunaler Ebene findet zudem eine [Förderung nachhaltiger Mobilitätsformen](#) statt. Diese Bemühungen werden gesellschaftspolitisch kontrovers diskutiert, u.a. weil damit eine [wachsende Konkurrenz um Flächennutzung](#) vor allem in dichter besiedelten Gebieten verbunden ist. Insgesamt steigt in Ballungsräumen die Vielfalt an Mobilitätsoptionen und es ist eine [zunehmende Nachfrage nach nachhaltigen Mobilitätsangeboten bei urbanen Bevölkerungsgruppen](#) zu beobachten. Diese äußert sich beispielsweise in einem weit überproportionalen Anstieg der mit dem Fahrrad zurückgelegten Wege und km [\[5\]](#), ein Trend, der v.a. in den in den großen Städten feststellbar ist und durch die [zunehmende Reichweite von Pedelecs und E-Bikes](#) zukünftig weiter unterstützt werden könnte.

Im Luft- und Schiffsverkehr sowie auch im Schwerlastverkehr ist die **Umstellung auf alternative Antriebe** weniger weit vorangeschritten als im Pkw-Bereich. Von den 3,94 Mio. in Deutschland zugelassenen Nutzfahrzeugen (Lkw und Sattelzugmaschinen) verfügen beispielsweise bislang 1,73 % über eine alternative Antriebsart [6]. Dies hat hauptsächlich damit zu tun, dass batterieelektrische Antriebe bislang für den Langstreckenbetrieb schwerer Fahrzeuge wenig geeignet sind. Abhilfe versprechen möglicherweise **neue Batteriekonzepte**, die derzeit entwickelt werden. Daneben werden neue Antriebskonzepte auf Basis klimaneutraler Kraftstoffe benötigt, die entweder aus Biomasse (B-Fuels) oder grünem Wasserstoff (E-Fuels) gewonnen werden. Ein Beispiel sind **Wasserstoff-Lkw**. Zu beobachten ist verkehrsträgerübergreifend eine **verstärkte Entwicklung entsprechender Motoren- und Fahrzeugkonzepte**, die jedoch meist erst als Prototypen verfügbar sind. Im Schifffahrtsbereich, der als besonders schwierig zu dekarbonisieren gilt, dominiert bei den alternativen Antrieben derzeit das zwar emissionsärmere, aber nach wie vor fossile Flüssigerdgas (LNG) ([Datengrafik](#)). Elektrische Antriebe dürften zukünftig vor allem in der Binnenschifffahrt Verbreitung finden. Um den Treibstoffbedarf von Hochseeschiffen zu senken, werden u.a. **Windzusatzantriebe** erforscht.

Die erforderliche Infrastruktur für Herstellung, Transport und Speicherung von Wasserstoff, der als Grundstoff für die Produktion von E-Fuels sowohl für die Dekarbonisierung der Luft- wie Schiffsverkehrs benötigt wird, steckt noch in den Kinderschuhen, wird jedoch mithilfe starker politischer Förderung sukzessive ausgebaut. Für die Herstellung von E-Fuels, für die neben Wasserstoff auch nachhaltig gewonnenes CO₂ benötigt wird (z.B. über Direct Air Capture), wurden erste Pilotanlagen gebaut.

Anzahl der weltweit betriebenen und bestellten Schiffe mit alternativen Antrieben*



nach Schiffs- und Antriebsart*

Source: DNV; IHS Markit; MARITIME FORECAST TO 2050 - Issue 2023, Seite 24 • Created with Datawrapper

Der weitere **Ausbau der Ladeinfrastrukturen** trägt laut Einschätzung der befragten Expert/innen maßgeblich zu einer erhöhten Resilienz des Infrastruktursystems bei (Abb. 10a/b). Die zunehmende Elektrifizierung des Verkehrssystems führt aber auch zu einem stark **steigenden Bedarf an erneuerbarer Energie und grünem Wasserstoff**, was aufgrund der starken Sektorkonkurrenz zukünftig zu Knappheiten führen könnte. Zudem muss das Stromnetz an die erhöhten Anforderungen, die durch gleichzeitiges Laden vieler Elektroautos entstehen, angepasst werden – hier können digitale Lösungen und neue Ladekonzepte helfen. Mit dem **Markthochlauf der Elektromobilität** steigt außerdem der **Bedarf an kritischen Rohstoffen und Schlüsselkomponenten** wie Batterien und Halbleitern, deren Produktion von ausländischen Herstellern dominiert wird. Erwartet wird beispielsweise, dass der Markt für Lithium-Ionen-Batterien bis 2030 jährlich um 30 % zunimmt [7]. Diese Trends erhöhen zusammen mit den **zunehmenden geoökonomischen Konflikten und Handelsrestriktionen**, so die relativ einhellige Meinung der befragten Expert/innen, die Vulnerabilität des Infrastruktursystems maßgeblich (**Datengrafik**). Auch der **zunehmende Fachkräftemangel**, der sich als Entwicklungshemmnis bei der Umstellung auf Elektromobilität erweisen könnte, wird als relevanter Vulnerabilitätsfaktor eingeschätzt. Alleine in der Automobil- und Zulieferindustrie Baden-Württembergs mit ihren aktuell rund 250.000 Beschäftigten könnten laut Prognosen bis 2030 40.000 Fachkräfte fehlen [8].

Aufkommende technologische Entwicklungen

Neue Batteriekonzepte

Die Batterie ist das teuerste Bauteil eines elektrisch betriebenen Fahrzeugs. Seit den 1990er Jahren haben sich Lithium-Ionen-Batterien durchgesetzt und eine kontinuierliche Weiterentwicklung erfahren. Sie bieten heute relativ hohe masse- und volumenbezogene Energiedichten und ermöglichen dadurch den Bau von Fahrzeugen mit Reichweiten von mehreren hundert km. Zudem weisen sie im Vergleich mit anderen Batteriesystemen eine eher lange Lebensdauer auf (bis zu 10 Jahre), haben aber auch Nachteile: etwa die Abhängigkeit von kritischen Rohstoffen wie Lithium, Nickel und Kobalt, die hauptsächlich aus dem Ausland importiert werden müssen, sowie die Brandgefahr. Weltweit forscht die Autoindustrie daher intensiv an alternativen Batteriekonzepten, mit denen sich eine noch höhere Energiedichte (und damit längere Reichweiten) erreichen und der Einsatz kritischer und teurer Materialien reduzieren lassen. Zu den vielversprechenden Alternativen gehören Feststoffbatterien, bei denen der flüssige Elektrolyt durch eine Feststoffalternative (Polymere, Keramiken oder hybrid) ersetzt wird [\[9\]](#). Feststoffbatterien basieren zwar auch auf Lithium, versprechen aber eine höhere Sicherheit und deutlich höhere Reichweiten [\[10\]](#). Der japanische Autohersteller Toyota hat angekündigt, in einigen Jahren ein Elektroauto auf den Markt zu bringen, das über eine Reichweite von bis zu 1.000 km verfügen soll [\[11\]](#). Daneben wird an Post-Lithium-Systemen geforscht, bei denen Lithium durch billigere und häufiger vorkommende Materialien ersetzt wird [\[12\]](#). Hier stehen insbesondere Natrium-Ionen-Batterien im Fokus – verschiedene chinesische Autohersteller haben eine Markteinführung angekündigt [\[12\]](#).

Schiffe mit Segelantrieb

Über den Schiffsverkehr wird ein Großteil des weltweiten Handels abgewickelt (rund 90% der Verkehrsleistung im globalen Güterverkehr). Dabei kommt nach wie vor hauptsächlich das umwelt- und klimaschädliche Schweröl zum Einsatz. Laut neuen Zielen der internationalen Seeschifffahrtsorganisation (IMO) sollen die Treibhausgasemissionen der internationalen Schifffahrt bis 2050 netto null erreichen [\[13\]](#). Die Umstellung des Schiffsverkehrs auf wasserstoffbasierte Kraftstoffe benötigt enorme Mengen an erneuerbarer Energie, den Aufbau einer Bunkerinfrastruktur in den

Häfen sowie die Entwicklung neuer Motorenkonzepte. Deshalb wird auch intensiv daran geforscht, wie sich die Energieeffizienz von Schiffen verbessern lässt. Neben einer optimierten Routenplanung sowie einem optimierten Schiffsdesign gehören zu den Optionen auch alternative Antriebslösungen. Insbesondere Segelantriebe versprechen hier große Einsparpotenziale. Sie kommen sowohl als Haupt- als auch als Nebenantriebe infrage. Als Windnebanantriebe werden Zugdrachen, feste Segel oder Tragflügel sowie Flettnerrotoren (feste, rotierende Zylinder) eingesetzt; mit letzteren lassen sich im Idealfall bis zu 30% des Energieverbrauchs einsparen [14]. Die Technologien sind schon seit längerem am Markt verfügbar, ihre Implementierung ist jedoch schwierig, da in der Regel auch Anpassungen am Schiffsdesign erforderlich sind. Mitte 2023 wurden – von rund 90.000 Schiffen weltweit (ohne Fischereischiffe) – 30 Schiffe mit Windzusatzantrieben ausgerüstet, bei weiteren 26 ist das in Planung [14]. Maximale Energieeinsparungen versprechen Windhauptantriebe. Ihr Einsatz kommt jedoch nur für Schiffstypen wie z.B. Massengutfrachter oder Tanker infrage, die keine freie Decksfläche für den Ladeumschlag benötigen. Außerdem ist eine völlige Neukonzeption der Schiffe erforderlich, weshalb die Entwicklung noch in einem sehr frühen Stadium steckt.

Wasserstoff-Lkw

Lkw im Kurzstreckenbetrieb, kleinere Lieferfahrzeuge und auch Busse, die im Stadtverkehr zum Einsatz kommen, lassen sich gut mittels Batterieantrieb elektrifizieren. Für den Langstreckenbetrieb von Lkw sind Batterien aufgrund begrenzter Reichweiten und langen Ladezeiten hingegen weniger geeignet. Eine Alternative ist der Antrieb mittels Wasserstoffbrennstoffzelle. Dabei wird Wasserstoff, der in einem Hochdrucktank komprimiert mitgeführt wird, zusammen mit Sauerstoff emissionsfrei zu Wasser verstromt. Der Wirkungsgrad ist zwar geringer als bei einer Batterie, jedoch ist die Reichweite einer Tankladung deutlich höher (800 bis 1.000 km) und die Betankung geht deutlich schneller [15]. Die Zahl der wissenschaftlichen Publikationen zu dieser Technologie ist seit 2020 exponentiell gestiegen [16]. Als erster Hersteller hat Hyundai 2020 einen Wasserstoff-Lkw in Serie gefertigt, der seit 2022 auch in Deutschland verfügbar ist [17]. Auch deutsche Hersteller (BMW, Daimler Truck) sowie die Firma Bosch, die bei der Entwicklung von Wasserstoffbrennstoffzellen führend ist, arbeiten

intensiv an der Serienreife der Wasserstofftechnologie [\[18\]](#)[\[19\]](#).
Hemmende Faktoren sind die derzeit noch eher ungünstigen
infrastrukturellen Rahmenbedingungen: So ist die ausreichende
Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff (zu einem konkurrenzfähigen
Preis) nicht sichergestellt und auch die Wasserstoffladeinfrastruktur
muss erst noch aufgebaut werden [\[20\]](#).

Fußnoten Trendcluster Alternative Antriebe

1. Allianz pro Schiene (2023): Elektrifizierung. 13.7.2023, www.allianz-pro-schiene.de/ (24.10.2023)
2. Kraftfahrt-Bundesamt (2023): Anzahl der Elektroautos in Deutschland von 2006 bis Oktober 2023. Statista, de.statista.com/ (24.10.2023)
3. Kraftfahrt-Bundesamt (2023): Anteil der Elektroautos am Bestand der Personenkraftwagen in Deutschland von 2013 bis 2023. Statista, de.statista.com/ (1.3.2024)
4. The Economist (2024): Western firms are quaking as China's electric-car industry speeds up. 11.1.2024, www.economist.com/ (18.1.2024)
5. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2019): Mobilität in Deutschland – MiD. Analysen zum Radverkehr und Fußverkehr. www.mobilitaet-in-deutschland.de/ (18.1.2024)
6. Deutscher Bundestag (2024): Förderprogramme für die Umstellung von LKWs und Bussen auf klimafreundliche Antriebe, dserver.bundestag.de/ (18.1.2024)
7. Roland Berger (2022): Steigende Nachfrage nach Lithium-Ionen-Batterien kann zu Engpässen in der Rohstoffversorgung führen. 6.4.2022, www.presseportal.de/ (18.1.2024)
8. Bertelsmann Stiftung (2023): Berufliche Übergangspfade in der Automobil- und Zulieferindustrie in Baden-Württemberg. Zusammenfassung, www.bertelsmann-stiftung.de/
9. The Economist (2023): Superbatteries will transform the performance of EVs. 23.8.2023, www.economist.com/
10. Volkswagen Group (2024): PowerCo bestätigt Ergebnisse: Feststoffzelle von QuantumScape besteht ersten Härtetest. 3.1.2024, www.volkswagen-group.com/ (1.3.2024)
11. Jones, N. (2024): The new car batteries that could power the electric vehicle revolution. In: Nature 626(7998), S. 248–251, DOI: [10.1038/d41586-024-00325-z](https://doi.org/10.1038/d41586-024-00325-z)
12. Baumann, M.; Weil, M. (2023): Batteriesysteme der Zukunft. Foresight und Technikfolgenabschätzung: Monitoring von Zukunftsthemen für das Österreichische Parlament, parlament.gv.at/
13. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2023c): Internationale Seeschiffahrts-Organisation (IMO) beschließt Klimaneutralität bis 2050. BMWI, 7.7.2023, www.bmwk.de/ (1.3.2024)
14. European Maritime Safety Agency (2023): Potential of Wind-Assisted Propulsion for Shipping, www.emsa.europa.eu/

15. Böhnisch, A. (2023): Wasserstoff-Antrieb für LKW: Ist das die Zukunft der Brennstoffzelle? 13.9.2023, www.swr.de/
16. Camacho, M. d. I. N.; Jurburg, D.; Tanco, M. (2022): Hydrogen fuel cell heavy-duty trucks: Review of main research topics. In: International Journal of Hydrogen Energy 47(68), S. 29505–29525, DOI: [10.1016/j.ijhydene.2022.06.271](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.06.271)
17. Hyundai (2022): Hyundai bringt Wasserstoff-Lkw XCIENT Fuel Cell nach Deutschland. 2.8.2022, www.hyundai.news/
18. BMW Group (2022): Forschungsprojekt HyCET: Konsortium treibt die Nachhaltigkeit in der Transportlogistik durch Wasserstoff-LKW weiter voran. www.press.bmwgroup.com/
19. Wilkens, A. (2023): Wasserstoff: Daimler-Truck GenH2 fährt 1000 km mit einer Tankfüllung. 27.9.2023, www.heise.de/
20. Küffner, C. (2022): Multi-level perspective for the development and diffusion of fuel cell heavy-duty trucks. In: Transportation Research Part D: Transport and Environment 111, S. 103460
DOI: [10.1016/j.trd.2022.103460](https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103460)

Trendcluster Vernetzte Mobilitätslösungen

Die Digitalisierung hat auch das Verkehrssystem voll erfasst. Fast alle öffentlichen und privaten Anbieter von Mobilitätsservices (ÖPNV, Car- und Bikesharing, Taxidienste etc.) bieten inzwischen Smartphone-Apps an, über die verschiedene Services und Echtzeitinformationen verfügbar und vermehrt integriert abrufbar sind. Bei Pkw gehören smarte Assistenzsysteme und in der Logistik zunehmend vernetzte Prozesse inzwischen zum Standard.

Laut einer repräsentativen Umfrage hat die Hälfte der Deutschen solche Mobilitäts-Apps installiert, wobei die meisten sie für den Kauf von ÖPNV-Tickets nutzen [1]. Zu beobachten ist ein **stark wachsender Markt für Mobilitätsdienstleistungen**. Dazu gehört, hauptsächlich im urbanen Bereich, die **Zunahme digital verfügbarer Angebote im Bereich Mikromobilität und Shared-Mobility** [2]. Insgesamt hat die Anzahl registrierter Carsharingnutzer/innen in Deutschland in den letzten 10 Jahren von rund 0,5 Mio. auf 4,5 Mio. zugenommen, die Anzahl der Stationen hat sich im selben Zeitraum auf 7.000 verdoppelt [3][4]. Der deutsche Sharingmarkt, der neben Carsharing auch Angebote im Bike- und E-Scooter-Sharing umfasst, dürfte laut Prognosen von 2022 bis 2027 um rund 4% auf 55,6 Mrd. US-Dollar wachsen [5].

Mit der Digitalisierung entstehen neue und bessere Möglichkeiten, unterschiedliche Verkehrsmittel miteinander zu vernetzen und Mobilitätsangebote bedarfsgerecht zu entwickeln. Letzteres zeigt sich bereits deutlich im **Hochlauf digital buchbarer On-demand-Verkehre**. Gemeint sind damit per App buchbare Sammelfahrten mit Kleinbussen oder Anrufsammeltaxis, die vor allem im ländlichen Raum oder zu Randzeiten außerhalb der Spitzenstunden helfen können, das Mobilitätsangebot zu verbessern. Seit 2021 hat sich die Zahl der On-demand-Projekte, die in den öffentlichen Verkehr integriert sind, auf 80 verdoppelt [6]. Die maßgeschneiderte Bereitstellung und direkte Buchung verschiedener Mobilitätslösungen (Bahn, ÖPNV, Car- und Bikesharing etc.) über multimodale Mobilitätsplattformen wird auch als **Mobility-as-a-Service** (MaaS) bezeichnet. Die **zunehmende Entwicklung von MaaS-Angeboten** wird in Deutschland vor allem von Kommunen und öffentlichen Verkehrsunternehmen vorangetrieben. Die mit öffentlichen Mobilitätsplattformen erhobenen Daten bilden heute schon eine immer wichtigere Ressource für die kommunale Verkehrsplanung und -steuerung [7]. Die **zunehmende Erhebung und Nutzung von Mobilitätsdaten** wird von den befragten Expert/innen als

ein besonders resilienzfördernder Trend eingeschätzt ([Datengrafik](#)). Mit Blick auf eine zunehmende Abhängigkeit von datenbasierten Diensten und der möglichen Entstehung von Monopolstrukturen sind mit der Digitalisierung des ÖPNV aber auch neue Risiken verbunden.

Im motorisierten Individualverkehr zeigt sich die Digitalisierung in der **zunehmenden Verbreitung vernetzter Pkw** (Connected Cars) [\[8\]](#), die sich per Internet mit datenbasierten Diensten verbinden können (u.a. intelligente Navigationsfunktionen, Gefahrenwarnungen oder Infotainmentangebote). Bei den Connected Services wird ein starkes Marktwachstum prognostiziert, deutsche Autohersteller gelten in diesem Bereich als besonders innovationsstark [\[9\]\[10\]](#). Angestrebt wird perspektivisch eine datenbasierte Kommunikation zwischen Pkw sowie der Datenaustausch zwischen Pkw und zumindest Teilen der Infrastruktur (z.B. Signalanlagen; Vehicle-to-Infrastructure-Kommunikation), wozu diese jedoch erst digital aufgerüstet werden muss. Neben Chancen hinsichtlich verbesserter Verkehrssicherheit sowie effizienterer Verkehrssteuerung – mit Potenzialen z.B. für das [Parkraummanagement](#) – ergeben sich durch diese Entwicklung aber auch Risiken im Bereich Cybersicherheit und Datenschutz.

Eine Voraussetzung für die flächendeckende Verfügbarkeit digitaler Mobilitätsangebote ist die Digitalisierung der Verkehrswege, insbesondere eine lückenlose Mobilfunkabdeckung. Vor allem bei Schienen- und Wasserwegen ist zusätzlich eine digitale Aufrüstung der Infrastruktur erforderlich. Hier ist die Entwicklung noch in einem frühen Stadium. Im Bereich der Binnenschifffahrt werden digitale Testfelder eingerichtet und erste Digitalisierungsprojekte auf den Weg gebracht [\[11\]](#). Im Schienenverkehr sind zwar **zunehmende Investitionen in digitale Leit- und Sicherungstechnik** im Rahmen des Programms „Digitale Schiene Deutschland“ [\[12\]](#) festzustellen, die jedoch noch massiv gesteigert werden müssen. Die Gesamtkosten für die Digitalisierung des Schienennetzes (u.a. Rollout des europäischen Zugsicherungssystems European Train Control System [ETCS]) werden auf 28 Mrd. Euro geschätzt [\[12\]](#). Laut Schätzungen lässt sich dadurch die Netzkapazität um bis zu 20 % erhöhen [\[13\]](#). Die befragten Expert/innen sind mit großer Mehrheit der Ansicht, dass sich mit dem Ausbau der digitalen Leit- und Sicherungstechnik im Schienenverkehr die Resilienz des Infrastruktursystems deutlich stärken lässt ([Datengrafik](#)). Die Maßnahme erscheint nicht zuletzt relevant vor dem Hintergrund, dass politisch eine stärkere Verlagerung des Personen- und Güterverkehrs von der Straße auf die Schiene angestrebt wird [\[14\]](#).

Aufkommende technologische Entwicklungen

Vollintegrierte Mobility-as-a-Service-Angebote

Mobilitäts-Apps sind inzwischen für fast alle öffentlichen Verkehrsangebote (Car- oder Bikesharing, ÖPNV, Bahn, Taxidienste etc.) verfügbar. Sie umfassen in der Regel verschiedene Funktionen wie Buchung des Verkehrsmittels oder intelligente Verkehrsinformationen in Echtzeit. Noch sind Mobilitätsplattformen allerdings in ihrer Funktionalität und ihrem Angebotsumfang meist begrenzt. In der Regel beschränken sie sich auf einzelne Verkehrsmittel (wie der Navigator der Deutschen Bahn). Weltweit werden jedoch, so auch in den größeren deutschen Städten, multimodale Plattformen getestet und vereinzelt auch bereits implementiert, die unterschiedliche Mobilitätsservices bündeln (in Berlin z.B. Jelbi, in Hamburg HVV Switch) [\[15\]\[7\]](#). Von MaaS-Angeboten, die multimodale Verkehrsmittel öffentlicher und privater Anbieter als eine vollintegrierte Dienstleistung verfügbar machen und nahtloses Planen, Buchen und Bezahlen ermöglichen, erhofft man sich eine Stärkung des Umweltverbundes [\[16\]](#). Rückgrat fast aller MaaS-Angebote bildet ein leistungsfähiger ÖPNV, weshalb die meisten Projekte von Kommunen und öffentlichen Verkehrsunternehmen vorangetrieben werden. Zu den wesentlichen Umsetzungshürden gehört die mangelnde Standardisierung von Daten und Schnittstellen sowie die mangelnde Bereitschaft und rechtliche Verpflichtung privater Anbieter, Daten bereitzustellen [\[15\]\[7\]](#). Zu den Vorhaben der aktuellen Bundesregierung gehört die Schaffung eines Mobilitätsdatengesetzes, das die »freie Zugänglichkeit von Verkehrsdaten« garantiert.

Digitales Parkraummanagement (Smart Parking)

Angeichts des begrenzten Platzangebots in Städten und zunehmender Flächenkonkurrenz zwischen Fuß-, Rad- und Pkw-Verkehr sind Kommunen zunehmend gefordert, den öffentlichen Raum neu aufzuteilen und möglichst effizient zu nutzen. Im Fokus steht dabei besonders der ruhende Verkehr, der angesichts des wachsenden Pkw-Bestandes immer mehr Flächen beansprucht. Neben der klassischen Parkraumbewirtschaftung (z.B. Anwohnerparken) bieten digitale Technologien neue Möglichkeiten für das Parkraummanagement. Unter dem Stichwort Smart Parking werden digitale Dienste und Lösungen

diskutiert, die darauf abzielen, das Parken einfacher, effizienter und bedarfsorientierter zu gestalten sowie Parksuchverkehre zu reduzieren. Lösungen umfassen datengestützte Verkehrsleitsysteme oder die dynamische Bepreisung von Parkflächen in Abhängigkeit von der Auslastung. Per App lassen sich freie Parkmöglichkeiten auffinden und einfach elektronisch bezahlen. Erforderlich ist dafür zum einen die Ausstattung von Parkzonen mit Sensoren und intelligenten Parkuhren, zum anderen eine digitale Parkflächenerfassung [17][18]. Rund 60% der deutschen Großstädte haben bereits Smart-Parking-Maßnahmen umgesetzt oder getestet [19]. Die dabei zu gewinnenden Daten bilden nicht nur eine wichtige Grundlage für die zukünftige Verkehrs- und Parkraumplanung, sondern ermöglichen prinzipiell auch eine digitale Parkraumüberwachung mittels Scanautos, die mit einer auf dem Dach installierten Kamera die Kennzeichen der parkenden Autos erfassen (wie es z.B. in Amsterdam bereits umgesetzt wird [18]).

Fußnoten Trendcluster Vernetzte Mobilitätslösungen

1. Bitkom Research (2023): Hälfte der Deutschen setzt auf Mobilitätsapps. www.bitkom.org/
2. Bitkom e.V. (2024): Mobilität: 4 von 10 nutzen Sharing-Angebote. www.bitkom.org/
3. Bundesverband CarSharing (2023): Anzahl der Carsharing-Stationen in Deutschland von 2010 bis 2023. Statista, 1.3.2024, de.statista.com/
4. Bundesverband CarSharing (2024): Anzahl registrierter Carsharing-Nutzer in Deutschland von 2014 bis 2024. 28.2.2024, de.statista.com/
5. Statista (2023g): Shared Mobility: market data & analysis. Market insights report, de.statista.com/
6. Die Verkehrsunternehmen (2023): Hochlauf der On-Demand-Verkehre im ÖPNV | VDV – Die Verkehrsunternehmen. 24.10.2023, www.vdv.de/
7. Koska, T.; Schneider, P. (2023): Digital in die Mobilitätswende, www.boell.de/
8. Center of Automotive Management (2022): Die Zukunft der Mobilität. Die Zukunftstrends in den Bereichen Elektromobilität, Connected Car und Mobilitätsdienstleistungen, www.bnpparibascardif.de/
9. Center of Automotive Management (2021): Verteilung der Innovationsstärke von Automobilherstellern im Bereich Connected

- Cars nach Herkunftsland in den Jahren 2019 und 2020. Statista, 1.3.2024, de.statista.com/
10. PricewaterhouseCoopers (2019): Prognose des Marktvolumens von fahrzeugbasierten Connected Services nach weltweiten Regionen in den Jahre 2018 bis 2030. Statista, 24.10.2023, de.statista.com/
 11. Johann, M. (2021): Digitalisierung der Wasserstraßen startet 2023. 30.8.2021, background.tagesspiegel.de/
 12. Bundesministerium für Digitales und Verkehr (2022): Digitalisierung Schiene. 9.2.2022, bmdv.bund.de/
 13. Wüpper, T. (2022): Digitale Schiene kostet bis zu 60 Milliarden Euro. 19.8.2022, background.tagesspiegel.de/
 14. SPD; Bündnis90/Die Grünen; FDP (2021): Mehr Fortschritt wagen. Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit, www.wiwo.de/
 15. Mitropoulos, L.; Kortsari, A.; Mizaras, V.; Ayfantopoulou, G. (2023): Mobility as a Service (MaaS) Planning and Implementation: Challenges and Lessons Learned. In: Future Transportation 3(2), S. 498–518. DOI: [10.3390/futuretransp3020029](https://doi.org/10.3390/futuretransp3020029)
 16. Klaas, K.; Kaas Elias, A. (2021): Mobilität als Dienstleistung – sozial gerecht? VCD Fact Sheet 10, www.vcd.org/
 17. PricewaterhouseCoopers (2022): Smart Parking: Digitale Lösungen optimieren Stadtverkehr. 26.1.2022, www.pwc.de/
 18. Umweltbundesamt (2021): Parkraummanagement für eine nachhaltige urbane Mobilität in der Stadt für Morgen, www.umweltbundesamt.de/
 19. PricewaterhouseCoopers (2024): Mobilität im Smart City Index 2022: Tiefe Kluft zwischen größeren und kleineren Städten. 2.2.2024, www.pwc.de/

Trendcluster Automatisiertes und autonomes Fahren

Mit der fortschreitenden Digitalisierung nimmt auch die Automatisierung von Fahrzeugen zu. Beide Entwicklungen sind eng miteinander verzahnt, da die Ausstattung mit moderner digitaler Sensorik eine wichtige Voraussetzung für Automatisierungslösungen ist. Bei praktisch allen Verkehrsträgern ist eine zunehmende Verbreitung hochautomatisierter und autonomer Fahrfunktionen zu beobachten.

Am weitesten fortgeschritten sind Automatisierungslösungen in Bereichen, in denen das Risiko unerwarteter Ereignisse und unübersichtlicher Situationen minimiert werden kann. Das ist beispielsweise bei Metrozügen und U-Bahnen der Fall. In 60 Städten weltweit fahren Züge inzwischen vollautomatisch (erstmalig 1983 in Frankreich), darunter seit 2008 auch in Nürnberg [1]. Erforderlich ist dafür eine Ausstattung der Strecken mit Kamera- und Radarsystemen sowie mit Rechnern. Auch bei der Steuerung von Großflugzeugen kommen bereits sehr weitreichende Automatisierungslösungen zum Einsatz, welche die Rolle des Piloten für die meiste Zeit des Flugs auf die Überwachung des Cockpits beschränken. Ein neuerer Trend sind autonome Flugtaxi, die u.a. im städtischen Bereich zum Einsatz kommen sollen. Seit einigen Jahren arbeiten Startups an entsprechenden Entwicklungen, gehofft wird auf einen boomenden Markt [2]. In China wurde 2023 erstmalig eine Musterzulassung für ein autonomes Flugtaxi erteilt. In Deutschland stehen dem Betrieb aber noch rechtliche Hürden entgegen. Zudem ist offen, für welche Anwendungsfälle Flugtaxi in Deutschland geeignet sind.

Schwieriger ist eine Automatisierung der Fahrfunktionen dort umzusetzen, wo es zu vielen gefährlichen oder unvorhergesehenen Situationen kommen kann. Bei Zügen, Schiffen und Autos ist die [technologische Entwicklung selbstfahrender Systeme](#) schon weit fortgeschritten und Prototypen werden auf Teststrecken bereits eingesetzt [3][4][5]. Weltweit erstmalig haben Mercedes und BMW ein hochautomatisiertes Assistenzsystem auf Level-3-Ebene (Fahraufgabe wird unter bestimmten Voraussetzungen vollständig an das Fahrzeug delegiert) in Serienreife vorgelegt und dafür auch bereits die Zulassung erhalten [6]. Mit dem neuen Gesetz zum autonomen Fahren wurden in Deutschland die rechtlichen Voraussetzungen dafür geschaffen, damit Pkw und Lkw in festgelegten Betriebsbereichen im öffentlichen Straßenverkehr im Regelbetrieb fahren können [7].

Auch im Öffentlichen Personennahverkehr wächst das Interesse von Unternehmen und Verkehrsverbünden am autonomen Fahren. Die Hoffnung ist, den ÖPNV mithilfe autonomer, fahrerloser Mobilitätskonzepte um flexible und günstige Angebote erweitern und damit die Mobilitätswende voranbringen zu können [8]. Zudem soll Automatisierung helfen, dem inzwischen spürbaren Mangel bei Fahrzeugführer/innen entgegen zu wirken [9]. Sowohl international als auch in Deutschland finden im öffentlichen Verkehr [zahlreiche Projekte und Erprobungen des fahrerlosen Fahrens mittels autonomer Pendel- und Kleinbusse](#) statt. Die Pläne sind in Hamburg weit fortgeschritten.

Dort wurde das vom Bund unterstützte Modellprojekt ALIKE gestartet, in dem ab 2025 autonome, per App buchbare und von MOIA (einer VW-Tochter) betriebene Kleinbusse in einigen Stadtteilen getestet werden. Bis 2030 sollen laut den Plänen bis zu 10.000 autonome Shuttles in Hamburg unterwegs sein [10]. Weltweit finden Testbetriebe für autonomes Fahren in den Bereichen Carsharing (Robotaxis) und Ride Pooling statt [11]. Am weitesten ist San Francisco, wo zwei Robotaxi-Anbieter seit August 2023 Fahrgäste ohne einen Sicherheitsfahrer (aber fernüberwacht) befördern dürfen [12]. Das Vorhaben erlitt jedoch einen teilweisen Rückschlag, nachdem einem der Anbieter die Erlaubnis für den Betrieb der 950 Robotaxis wieder entzogen wurde. Dessen Fahrzeug war, allerdings nicht ursächlich, in einen Personenunfall verwickelt und hatte im Nachgang dazu nicht situationsangemessen agiert. Zudem wurde dem Betreiber vorgeworfen, nicht aktiv und transparent zur Aufklärung des Geschehens beigetragen zu haben.

Die Automatisierung bietet für den **stark wachsenden Güter- und Lieferverkehr** [13] vielversprechende Optionen, die Logistik effizienter und nachhaltiger sowie ggf. resilienter zu gestalten. Dies betrifft nicht nur die Prozesse im Warenlager und auf dem Werksgelände, wo Roboter und fahrerlose Transportsysteme zunehmend Einzug halten. Es werden auch neue Konzepte wie beispielsweise das **Platooning** oder vollautomatisierte Binnenschiffe erprobt. Schließlich ist auch eine **Zunahme innovativer Logistiklösungen für die Letzte Meile** (z.B. Micro-Hubs) zu beobachten, ein Trend, der auch die Entwicklung **autonomer Lieferkonzepte** auf dem Boden und in der Luft umfasst.

Aufkommende technologische Entwicklungen

Platooning

Als Platooning wird das Fahren in Kolonne bezeichnet, wobei zwischen den Fahrzeugen ein möglichst geringer Abstand besteht und das vorderste Fahrzeug Richtung und Geschwindigkeit vorgibt. Möglich wird diese Spielart des automatisierten Fahrens durch die informationstechnische Kopplung der Fahrzeuge. Platooning verspricht diverse Vorteile [14]: So kann Personal eingespart werden, da prinzipiell nur noch für das vorderste Fahrzeug ein Fahrer benötigt wird. Durch den reduzierten Luftwiderstand für die hinteren Fahrzeuge lassen sich außerdem Treibstoffverbrauch und -kosten reduzieren. Schließlich werden auch für den Verkehrsfluss und die Verkehrssicherheit positive

Effekte erwartet – das Fahren im Konvoi kann insbesondere dabei helfen, die Staugefahr zu reduzieren [15]. [Getestet](#) wurde Platooning vor allem bei Lkws und für Fahrten auf Autobahnen, aber auch für [Binnenschiffe](#) sowie Busse in Innenstädten gibt es aktuellere Projekte [16]. In welchem Umfang sich die beschriebenen Potenziale realisieren lassen, hängt von den konkreten Umständen ab und lässt sich nicht verlässlich verallgemeinern. Offen sind vor allem noch regulatorische Fragen hinsichtlich Datenschutz und Verkehrssicherheit sowie die Definition herstellerübergreifender Kommunikationsstandards [14]. Denn klar ist, dass sich die Vorteile des Platooning erst dann voll entfalten können, wenn sich auch Fahrzeuge unterschiedlicher Hersteller miteinander koppeln lassen. Zudem ist strittig, wie sich längere Platoons auf das dynamische Verkehrsgeschehen auf Autobahnen, insbesondere an Auffahrten und Knotenpunkten, auswirken.

Autonome Last-Mile-Lieferung

Das starke Wachstum des Onlinehandels – der Warenumsatz hat sich in den letzten 10 Jahren rund verdoppelt, mit einem Höhenflug während der COVID-19-Pandemie [17] – hat zu einer starken Zunahme der Lieferverkehre geführt. Besonders die letzte Meile, also das letzte Teil der Lieferkette, bereitet in urbanen Bereichen zunehmend Probleme. Die kleinteilige Belieferung einer Vielzahl von Kund/innen durch Lieferfahrzeuge ist besonders kosten- und emissionsintensiv und trägt zu verstärkten Verkehrsproblemen bei. Die Logistikdienstleister stehen in der Folge unter einem starken Innovationsdruck, da auch die Erwartungen der Kund/innen an eine pünktliche sowie flexible Paketzustellung steigen [18]. Neben Lösungen wie Paketshops und Packstationen oder der Einrichtung von Micro-Hubs, die als Umschlagpunkte dienen, wird von Logistikunternehmen und Start-ups bereits seit Jahren auch an autonomen Lieferkonzepten für die letzte Meile gearbeitet. Weltweit sind in verschiedenen Projekten Paket- und Lieferdrohnen getestet worden, so auch in Deutschland: 2023 testete der Lebensmittelhändler Rewe im Hamburger Stadtteil Elmsbüttel für drei Monate die Lebensmittelzustellung mittels Lieferrobotern [19]. Ein erster vollautomatisierter Drohnenlinienflugbetrieb startete Anfang 2024 als Lieferservice für Unternehmen im nordrhein-westfälischen Lüdenscheid, ein Pilotprojekt ist in Berlin geplant [20][21]. Wissenschaftliche Untersuchungen, die aber meist noch theoretischer Art sind, zeigen das Potenzial, mit autonomen Zustelloptionen Kosten und Umwelteffekte senken zu können [22]. Die vielen gescheiterten Projekte [23] verweisen aber auch auf die noch bestehenden

Herausforderungen, die in regulatorischen Hürden sowie ungelösten Fragen hinsichtlich Paketübergabe bestehen.

Referenzen

1. Kreipp, A.-S. (2023): Autonome Züge – Im ÖPNV fahrerlos sicher unterwegs. Fraunhofer IKS, 25.9.2023, safe-intelligence.fraunhofer.de/ (17.1.2024)
2. The Economist (2023b): Flying taxis could soon be a booming business. 17.8.2023, www.economist.com/ (18.1.2024)
3. Hagemann, A. (2022): Binnenschifffahrt der Zukunft: Automatisiert und emissionsfrei. 15.8.2022, www.dvz.de/ (13.11.2023)
4. Klaus Peters (2021): Autonome Schiffe gegen den Lieferwahnsinn auf den Straßen. 23.4.2021, background.tagesspiegel.de/
5. Kugoth, J. (2022): Autonome Züge: Schon 2023 auf der Schiene. Tagesspiegel Background, 21.10.2022, background.tagesspiegel.de/
6. Greis, F. (2023): Level 3 im Stau: BMW erhält Zulassung für hochautomatisiertes Fahren – Golem.de. In: Golem.de 26.09.2023, www.golem.de/
7. BMDV (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur) (2021): Gesetz zum autonomen Fahren tritt in Kraft. bmdv.bund.de/ (18.1.2024)
8. Yen, R.; Binder, N. B.; Pitzen, C.; Schippl, J. (2024): Automatisierter ÖPNV: Hintergründe und praktische Anleitung zur Umsetzung in kleineren Städten und ländlichen Regionen. Berlin, Heidelberg DOI: [10.1007/978-3-662-66998-3](https://doi.org/10.1007/978-3-662-66998-3)
9. Bocksch, R. (2023): Fahrermangel im ÖPNV droht – Statistik der Woche. 28.3.2023, www.heise.de/ (19.1.2024)
10. MOIA (2023): MOIA bringt mit ALIKE autonomes Ridepooling auf die Straße. 19.11.2023, www.moia.io/ (18.1.2024)
11. Berylls Strategy Advisors (2023): Anzahl der Testbetriebe für autonomes Fahren nach Regionen und weltweit im Jahr 2023. Statista, 4.1.2024, de.statista.com/ (8.2.2024)
12. Tiedemann, Y. (2024): Stehen Robotaxis vor dem Durchbruch? 17.1.2024, www.automotiveit.eu/ (8.2.2024)
13. Destatis (2023): Güterverkehr. 24.10.2023, www.destatis.de/ (24.10.2023)
14. Universität Paderborn (2023): Platooning: Wie kooperativ fahrende Fahrzeug-Kolonnen den Verkehr sicherer und effizienter machen. 17.5.2023, diserhub.de/platooning/

15. Fakhfakh, F.; Tounsi, M.; Mosbah, M. (2020): Vehicle Platooning Systems: Review, Classification and Validation Strategies. In: IJNDC 8(4), S. 203. DOI: 10.2991/ijn/dc.k.200829.001
16. KIT (Karlsruher Institut für Technologie) (2023): Automatisiertes Fahren in Kolonne: Schub für Flexibilisierung des Busverkehrs. 4.4.2023, www.kit.edu/
17. Bevh (Bundesverband E-Commerce und Versandhandel Deutschland e.V.) (2024): E-Commerce-Umsatz mit Waren in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2023. Statista, de.statista.com/ (1.3.2024)
18. PwC (PricewaterhouseCoopers) (2017): Aufbruch auf der letzten Meile. Neue Wege für die städtische Logistik, www.pwc.de/
19. Wegner, A. (2023): Rollende »Warenkörbe« bringen's in Hamburg. REWE startet autonom fahrendes Einkaufskonzept in der Hansestadt. 8.5.2023, mediacenter.rewe.de/
20. Donath, A. (2023): Lieferdrohnen dürfen in Berlin außerhalb der Sicht fliegen. 14.12.2023, www.golem.de/
21. Tagesspiegel Background (2024): Erster Linienflugbetrieb mit Drohnen aufgenommen. 22.2.2024, background.tagesspiegel.de/
22. Alverhed, E.; Hellgren, S.; Isaksson, H.; Olsson, L.; Palmqvist, H.; Flodén, J. (2024): Autonomous last-mile delivery robots: a literature review. In: Eur. Transp. Res. Rev. 16(1). DOI: [10.1186/s12544-023-00629-7](https://doi.org/10.1186/s12544-023-00629-7)
23. Löwen, C. (2022): Vollautonome Lieferroboter. Lost auf der Last Mile? 16.12.2022, www.automotiveit.eu/

Systemische Risiken und ihre Auswirkungen auf das Infrastruktursystem Verkehr und Mobilität

Ein robustes Verkehrssystem, das den Transport von Gütern und Personen sicherstellt, ist eine grundlegende Voraussetzung für moderne Gesellschaften und arbeitsteilige Volkswirtschaften. Systemische Risiken gefährden das gesamte Infrastruktursystem Verkehr und Mobilität und können sowohl die Funktionalität als auch die Stabilität im Sinne der Sicherheit und Verfügbarkeit der Infrastruktur grundlegend beeinträchtigen. Zudem können sie das Erreichen des politisch festgelegten Ziels der Klimaneutralität Deutschlands bis 2045 beeinflussen und die Abkehr von konventionellen, oft umweltbelastenden Verkehrsmitteln hin zu umweltfreundlichen und nachhaltigen Verkehrs- und Mobilitätsoptionen hemmen.

Systemische Risiken bezeichnen komplexe Gefahren oder Bedrohungen, die nicht nur auf bestimmte Einzelteile eines Infrastruktursystems wirken, sondern das gesamte System betreffen. Zudem gefährden sie unterschiedliche Infrastruktursysteme oftmals gleichzeitig, da multikausale Wechselwirkungen und Kaskadeneffekte auftreten.

Auf den folgenden Seiten behandeln wir aus der Perspektive der systemischen Risiken die folgenden Fragen: Wie ist der gegenwärtige Stand der Gefährdungslagen für das Infrastruktursystem Verkehr und Mobilität mit Bezug auf alle relevanten systemischen Risiken, welche Bereiche des Systembilds sind besonders betroffen und wie robust ist das Infrastruktursystem? Welche systemischen Risiken entwickeln sich besonders dynamisch und mit welchen Folgen für das Infrastruktursystem? Und welche Gefährdungslagen ergeben sich im Zuge der Transformation?

Status quo der Gefährdungslagen

Die Gefährdung für das Infrastruktursystem Verkehr und Mobilität durch systemische Risiken betrifft verschiedene Teile des Infrastruktursystems und ist unterschiedlich akut. Die Gefährdung des

Infrastruktursystems durch systemische Risiken ist – auf Grundlage der ausgewerteten Quellen sowie der Ergebnisse der durchgeführten Fachgespräche – insgesamt als mittel einzustufen. Die Funktionsfähigkeit und Stabilität des Verkehrs- und Mobilitätssystems werden derzeit vor allem durch geopolitische Konflikte, Wetterextreme und Versorgungsengpässe bedroht. Um diesen Risiken und ihren Folgen zu begegnen, ist die Robustheit des Infrastruktursystems entscheidend. Die Gesamtrobustheit des gegenwärtigen Infrastruktursystems wird im Rahmen unserer Befragung des Resilienz-Radars als mittel eingeschätzt, während sie gegenüber Pfadabhängigkeiten, Cyberkriminalität, Versorgungsengpässen und auch gesellschaftlicher Polarisierung als eher gering bewertet wird. Es ist daher wichtig, aufkommende Störereignisse und Krisen frühzeitig zu erkennen und die vorhandenen Erkenntnisse zur Entwicklung innovativer Maßnahmen und zur Steigerung der Resilienz zu nutzen.

Das Gefährdungspotenzial durch die stark miteinander verbundenen systemischen Risiken **globale Erwärmung** und **Wetterextreme** ist für das gesamte deutsche Verkehrs- und Mobilitätssystem besonders hoch [1]. Extremwetterereignisse sind eine der Hauptursachen für Unterbrechungen des Personen- und Güterverkehrs. Die Verkehrsträger Luft, Wasser, Schiene und Straße sowie alle Verkehrsmittel können plötzlich und schwerwiegend von Extremwetterereignissen betroffen sein [2]. Die im Zuge der **globalen Erwärmung** zunehmende Häufigkeit von Extremwetterereignissen, wie Hitzewellen oder langanhaltende Dürren, wirkt auf alle Bereiche des Infrastruktursystems.

Die voranschreitende Digitalisierung und Vernetzung im Verkehrs- und Mobilitätssystem können einerseits die Effizienz und Funktionalität aller Systembereiche erheblich steigern, bergen jedoch andererseits neue Risiken bzw. verstärken bereits bestehende Gefährdungspotenziale. Insbesondere die Eintrittswahrscheinlichkeit für die systemischen Risiken **Cyberkriminalität** sowie **Technikversagen und eingeschränkte Technikbeherrschbarkeit** nimmt vor dem Hintergrund der Digitalisierung des Infrastruktursystems zu. Hardware- oder Softwarefehler, Ransomwareangriffe, bei denen Daten verschlüsselt und erst gegen Lösegeld wieder freigegeben werden, oder auch Datenschutzverletzungen durch Sicherheitslücken bringen ein erhöhtes Sicherheitsrisiko für alle Bereiche im Infrastruktursystem Verkehr und Mobilität mit sich [3].

Ein substanzielles Gefährdungspotenzial für das Verkehrs- und Mobilitätssystem geht von **Epidemien und Pandemien** aus. Die COVID-19-Pandemie hat gezeigt, dass es durch krankheitsbedingte massive

Personalausfälle und Kontaktsperren zu erheblichen Herausforderungen und Einschränkungen für das gesamte Infrastruktursystem – von der Luftfahrt über die Logistik bis hin zum öffentlichen Verkehr – kommen kann [4]. Die Schäden betrafen alle Systembereiche: von der Produktion von Fahrzeugen und Komponenten über Planung, Bau und Unterhalt der Infrastruktur bis zum Betrieb der Infrastruktur. Die weltweit verhängten Maßnahmen zur Bekämpfung der Pandemie, wie Lockdowns, Kontaktbeschränkungen und Transportverbote, führten auch zu erheblichen wirtschaftlichen Verlusten im gesamten Infrastruktursystem [5]. Zudem haben sich seit der COVID-19-Pandemie Veränderungen in der Verkehrsmittelnutzung ergeben: Der Anteil derjenigen, die das Auto dem öffentlichen Personennahverkehr vorziehen, ist im Vergleich zur Zeit vor Corona um fast 10 % gestiegen [6].

Blackouts bergen ein erhebliches Gefährdungspotenzial für das gesamte Verkehrs- und Mobilitätssystem, insbesondere für den reibungslosen Betrieb der Infrastruktur. Stromabhängige Komponenten aller Verkehrsträger fallen bei einem Blackout entweder sofort oder innerhalb weniger Stunden aus. Dies führt beispielsweise zu Ausfällen von Ampelsystemen und Tankstellen oder zur Beeinträchtigung der elektrisch gesteuerten Gleisweichen. Die Eintrittswahrscheinlichkeit eines flächendeckenden Stromausfalls wird für Deutschland insgesamt jedoch als eher gering eingeschätzt [7]. Das TAB hat bereits 2010 detaillierte Wirkungsanalysen zu einem Blackout in Deutschland veröffentlicht.

Auch von dem systemischen Risiko **geopolitische Konflikte** geht ein hohes Gefährdungspotenzial aus, welches sich vor dem Hintergrund aktueller politischer Entwicklungen weiter erhöht. So führte beispielsweise der Angriff der Huthi-Milizen auf Schiffe im Roten Meer dazu, dass längere, aber sichere Transportrouten gewählt wurden, die mit höheren Kosten sowie Lieferverzögerungen einhergingen. Zudem zeigten sich die Folgen der Angriffe in einem massiven Anstieg an Versicherungskosten für die Handelsschiffe [8]. Vor allem die Bereiche Produktion von Verkehrsmitteln und Komponenten sowie der Betrieb der Infrastruktur sind von geopolitischen Konflikten grenzüberschreitend betroffen [9].

Versorgungsengpässe bei Energie und kritischen Rohstoffen führen zu steigenden Preisen bei allen Verkehrsmitteln und insbesondere für Pkw [10]. Vor allem mit Blick auf das Erreichen der Transformationsziele des Verkehrs- und Mobilitätssystems ist das systemische Risiko zunehmend relevant und mit einer steigenden

Eintrittswahrscheinlichkeit verbunden. Versorgungsengpässe, auch ausgelöst durch geopolitische Konflikte, sowie eine steigende Nachfrage nach kritischen Rohstoffen, wie Kobalt oder auch Lithium für Elektrobatterien, wirken sich vor allem auf die Bereiche Produktion von Fahrzeugen und Komponenten, Planung, Bau und Unterhalt der Infrastruktur, aber auch auf den Betrieb der Infrastruktur aus.

Des Weiteren hat die **gesellschaftliche Polarisierung** als systemisches Risiko eine mittlere Gefährdungslage für das Infrastruktursystem und wirkt vor dem Hintergrund der Verkehrs- und Mobilitätswende insbesondere auf das Mobilitätsverhalten sowie die Systembereiche Betrieb der Infrastruktur und Transport- und Mobilitätsleistungen. Zugangsmöglichkeiten und die Nutzung bestimmter Verkehrsmittel sind zunehmend abhängig von Einkommen, mobilitätsbezogener Kaufkraft, Wohnumfeld, verfügbarer Verkehrsinfrastruktur, Bildungsniveau und der Fähigkeit zur Nutzung komplexer Verkehrsangebote [\[11\]\[12\]](#).

Das systemische Risiko der **Machtkonzentration** hat gemäß der Quellenanalyse für das Verkehrs- und Mobilitätssystem gegenwärtig ein mittleres Gefährdungspotenzial, welches durch die zunehmende Verbreitung digitaler Technologien weiter zunimmt [\[13\]](#). Die Digitalisierung führt zu neuen Abhängigkeiten in allen Bereichen des Infrastruktursystems. So sind beispielsweise deutsche Fahrzeughersteller oder auch der öffentliche Nahverkehr zunehmend von Technologieunternehmen oder Plattformbetreibern abhängig. Sie benötigen sowohl neue Hardware für alle Fahrzeuge als auch komplexere digitale Systeme und Vernetzungstechnologien [\[14\]\[15\]](#).

Das systemische Risiko **Pfadabhängigkeiten** gefährdet das Erreichen der Transformationsziele und wirkt vor allem auf die Bereiche Produktion von Fahrzeugen und Komponenten, Planung, Bau und Unterhalt der Infrastruktur, aber auch auf den Betrieb der Infrastruktur. Pfadabhängigkeiten entstehen, wenn der Übergang zu alternativen Optionen erschwert oder verhindert wird [\[16\]](#). Die institutionellen Steuerungs- und Regelungsmechanismen sowie langfristige Investitionen im Verkehrs- und Mobilitätssystem sind seit Jahrzehnten auf die Marktdominanz und den Erhalt von Verbrennungsmotoren sowie eine geeignete Infrastruktur für den Individual- und Güterverkehr ausgerichtet. Insbesondere die Kosten sowie tradierte Denk- und Verhaltensmuster der beteiligten Akteure erschweren Veränderungen hin zu einem Pfadwechsel [\[16\]\[17\]](#).

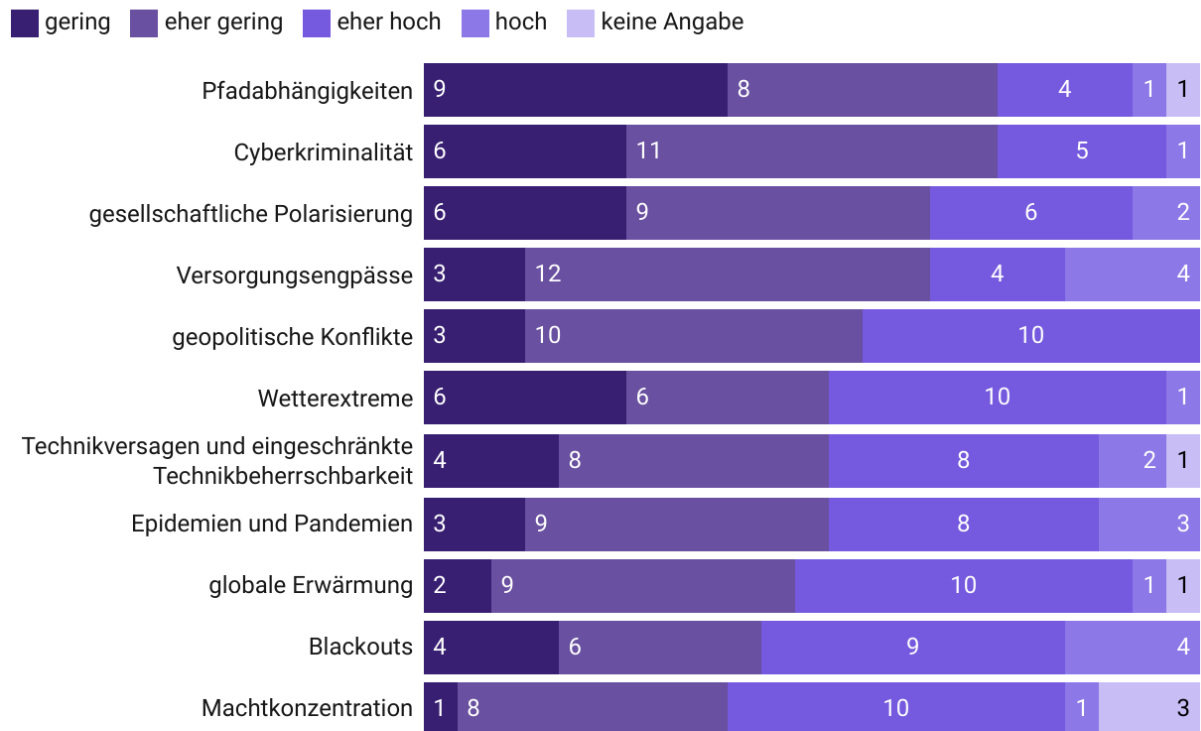
Nicht zuletzt muss die Verzahnung der Infrastruktursysteme berücksichtigt werden. Störungen oder Beeinträchtigungen der Funktionalität des Infrastruktursystems können sowohl zu einer

unzureichenden Versorgung mit essenziellen Ressourcen wie Energie und Nahrungsmitteln führen und wirken sich daher spürbar auf die Funktionalität anderer Infrastruktursysteme und damit auf alle gesellschaftlichen Lebensbereiche aus. Durch die digitale Integration und Vernetzung steigt zudem die Abhängigkeit von Informations- und Kommunikationstechnologien [18]. In Zeiten zunehmender Vernetzung auch zwischen den verschiedenen Infrastruktursystemen müssen mögliche Kaskadeneffekte immer stärker in den Blick genommen werden.

Einschätzung der Robustheit: Ergebnisse der Panelbefragung

Die Robustheit des (gegenwärtigen) Infrastruktursystems Verkehr und Mobilität hinsichtlich systemischer Risiken wurde im Rahmen der empirischen Erhebungen und der Panelbefragung bewertet. Die Gesamtbewertung des Verkehrs- und Mobilitätssystems über alle systemischen Risiken liegt bei einer mittleren Robustheit. Bei der Bewertung einzelner systemischer Risiken gibt es jedoch deutliche Unterschiede. Die Robustheit im Hinblick auf das systemische Risiko **Pfadabhängigkeiten** wird als am geringsten eingeschätzt. Die Robustheit gegenüber den systemischen Risiken **Cyberkriminalität, gesellschaftliche Polarisierung** sowie **Versorgungsengpässe** wird als eher gering eingeschätzt. Hingegen wird von den Expert/innen die Robustheit des Infrastruktursystems gegenüber dem systemischen Risiko **Machtkonzentrationen**, aber auch bezüglich **Blackouts** derzeit als eher hoch eingeschätzt.

Wie schätzen Sie derzeit den Grad der Robustheit des Infrastruktursystems Verkehr und Mobilität in Bezug auf die folgenden systemischen Risiken ein?



Ergebnisse aus der Expertenbefragung zum Infrastruktursystem Verkehr und Mobilität (n=23)

Quelle: TAB, Resilienz-Radar 2023/24 • Erstellt mit Datawrapper

Referenzen

1. Voß, M.; Kahlenborn, W.; Porst, L.; Dorsch, L.; Nilson, E.; Rudolph, E.; Lohrengel, A.-F. (2021): Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland. Teilbericht 4: Risiken und Anpassung im Cluster Infrastruktur. Umweltbundesamt, www.umweltbundesamt.de/
2. Hänsel, S.; Herrmann, C.; Jochumsen, K.; Klose, M.; Nilson, E.; Norpoth, M.; Patzwahl, R.; Seiffert, R. (2020): Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen. Ergebnisbericht des Themenfeldes 1 im BMVI-Expertennetzwerk für die Forschungsphase 2016-2019. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, www.bmdv-expertennetzwerk.bund.de/
3. Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (2022): Die Lage der IT-Sicherheit in Deutschland 2022. Bonn, www.bsi.bund.de/
4. DLR Verkehr (2024): Fünfte DLR-Befragung: Wie verändert Corona unsere Mobilität? | DLR Verkehr. DLR Verkehr, 19.1.2024, www.verkehrsforschung.dlr.de/
5. International Transport Forum (ITF) OECD (2021): ITF Transport Outlook 2021. International Transport Forum (ITF) at the OECD. DOI: [10.1787/16826a30-en](https://doi.org/10.1787/16826a30-en)
6. FIS (2022): Langfristige Auswirkungen von Pandemien auf den Personenverkehr, www.forschungsinformationssystem.de/ (1.2.2024)
7. Bundesnetzagentur (2024): Droht der Blackout? Über die Stromversorgung in Deutschland, www.bundesnetzagentur.de/ (7.3.2024)
8. Tagesschau (2023): Huthi-Angriffe im Roten Meer: Eine Gefahr – nicht nur für den Welthandel. In: tagesschau.de (17.12.2023), www.tagesschau.de/
9. Muench, S.; Stoermer, E.; Jensen, K.; Asikainen, T.; Salvi, M.; Scapoo, F. (2022): Towards a green & digital future. Key requirements for successful twin transitions in the European Union. JRC science for policy report JRC129319, Luxembourg. DOI: [978-92-76-52451-9](https://doi.org/978-92-76-52451-9)
10. Wieler, J. (2022): Autopreise: Neuwagen immer teurer. Doch muss das sein? In: ADAC (08.09.2022), www.adac.de/ (27.2.2024)
11. Agora Verkehrswende (2023): Mobilitätsarmut in Deutschland. Annäherung an ein unterschätztes Problem mit Lösungsperspektiven für mehr soziale Teilhabe und Klimaschutz. Agora Verkehrswende, www.agora-verkehrswende.de/
12. Wissenschaftlicher Beirat BMDV (2023): Mobilitätswende in Stadt und Land – Klimaschutz und räumliche Gerechtigkeit als Transformationsziele des Verkehrs. Bundesministerium für Digitales und Verkehr, www.bmdv.bund.de/
13. Hofmann, K. M.; Hanesch, S.; Levin-Keitel, M.; Krummheuer, F.; Serbser, W. H.; Teille, K.; Wust, C. (2021): Kapitel 1 Auswirkungen von

- Digitalisierung auf persönliche Mobilität und vernetzte Räume – Zusammenfassende Betrachtung der Unseens digitaler Mobilität. DOI: [10.5771/9783748924111](https://doi.org/10.5771/9783748924111)
14. Flore, M.; Kröcher, U.; Czycholl, C. (2021): Unterwegs zur neuen Mobilität. Perspektiven für Verkehr, Umwelt und Arbeit. DOI: [10.14512/9783962388249](https://doi.org/10.14512/9783962388249)
 15. Strauß, S.; Bettin, S. (2023): Digitalisierung, Vulnerabilität und (kritische) gesellschaftliche Infrastrukturen. Entwicklungsstand, Trends und zentrale Herausforderungen. Institut für Technikfolgen-Abschätzung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, epub.oeaw.ac.at/
 16. Fishedick, M.; Grunwald; ArminCanzler, W.; Dieckhoff, C.; Hirsch Hador, G.; Kasten, P.; Requate, T.; Robinius, M.; Thrän, D.; Vetter, D.; Voß, J.-P. (2017): Pfadabhängigkeiten in der Energiewende. Das Beispiel Mobilität. Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft, München, epub.wupperinst.org/
 17. Kahlenborn, W.; Clausen, J.; Behrendt, S.; Göll, E. (Hg.) (2019): Auf dem Weg zu einer Green Economy. Wie die sozialökologische Transformation gelingen kann. Neue Ökologie Band 3, Bielefeld. DOI: [978-3-8376-4493-7](https://doi.org/978-3-8376-4493-7)
 18. IZT (2024): Resiliente Mobilität in Baden-Württemberg -. Herausforderungen für und Anforderungen an ein elektrifiziertes Mobilitätssystem der Zukunft. e-mobil BW GmbH, www.e-mobilbw.de/

Entwicklungsdynamiken ausgewählter systemischer Risiken und Gefährdungslagen

Systemische Risiken unterliegen einer teils starken Entwicklungsdynamik. Sowohl die Eintrittswahrscheinlichkeit als auch die konkrete Form der durch sie ausgelösten Gefährdungslagen für das Verkehrs- und Mobilitätssystem können sich verändern. Derzeit steigt die Gefährdung für das Infrastruktursystem vor allem durch die globale Erwärmung und die im Zuge des Klimawandels zunehmenden Wetterextreme. Auch für die Gefährdungslage durch Cyberkriminalität sowie Technikversagen und eingeschränkte Technikbeherrschbarkeit zeichnet sich im Zuge des digitalen Wandels ein deutlicher Anstieg ab. Aber auch der Anstieg und die Verhärtung geopolitischer Konflikte einschließlich der eng hiermit verknüpften Versorgungsengpässe führen zu einer Veränderung der Gefährdungslage für das Verkehrs- und Mobilitätssystem.

Infolge der [globalen Erwärmung](#) und gemäß Klimaprojektionen wird auch in Deutschland die Häufigkeit von [Wetterextremen](#), wie beispielsweise Überschwemmungen, Hitzewellen und langandauernde Dürren oder Niedrigwassersituationen, die sich auf das Infrastruktursystem Verkehr und Mobilität auswirken, deutlich zunehmen [\[1\]](#). Besonders schwerwiegend sind derartige Ereignisse, wenn sie einen langanhaltenden Charakter haben und mehrere Verkehrsträger gleichzeitig betreffen. Bei Starkregen und den damit einhergehenden Überflutungen, Hangrutschungen und Unterspülungen werden die meisten Schäden an Straßen und Schienenwegen hervorgerufen. Straßen können großflächig überflutet werden, wodurch der Straßenverkehr zum Erliegen kommt. Gleise können unterspült werden, wodurch es zu zeitlichen Verzögerungen und Sperrungen im Schienenverkehr kommen kann. Bei Hochwasser treten Gewässer über die Ufer, was nicht nur den Binnenschiffsverkehr beeinträchtigt, sondern darüber hinaus auch zu zusätzlichen Schäden an der angrenzenden Infrastruktur führt, sodass beispielsweise auch ufernahe Straßen und Schienen betroffen sind [\[2\]](#). Hitze kann auf älteren Fahrbahnen zu [Blow-ups](#) führen, wenn Betonplatten aufbrechen oder der Asphalt schmilzt, und in der Folge Streckensperrungen verursachen [\[3\]](#).

Zunehmende Dürreperioden verursachen, anders als Starkregen oder Stürme, keine direkten Schäden an der Infrastruktur, sie können jedoch den laufenden Betrieb und langfristig sogar die Funktionsfähigkeit des gesamten Systems beeinträchtigen. So stellen zunehmende Niedrigwassersituationen vor allem für die Binnenschifffahrt erhebliche Einschränkungen dar, da Schiffe mit großem Tiefgang nicht mehr voll beladen oder gar nicht mehr fahren können. Dies führt insgesamt zu einer geringeren Gütermenge pro Fahrt und beeinträchtigt die wirtschaftliche Effizienz der Beförderung. 2022 transportierte die deutsche Binnenschifffahrt 182 Mio. t Güter, ein Rückgang um 6,4 % im Vergleich zu 2021 und das niedrigste Volumen seit 1990. Gründe sind neben Produktionsrückgängen das Niedrigwasser im August 2022 [\[4\]](#). Eine ausführliche Risikoanalyse befasst sich mit den Auswirkungen eines mehrjährigen Dürreszenarios auf die Wasserstraßen in Deutschland und weist auf die steigende Gefährdung durch verändertes Wetter hin [\[5\]](#).

Bereits heute beeinflusst die [globale Erwärmung](#) auch den Luftverkehr. Eine häufigere und schnellere Bildung von Wirbelstürmen und Gewitterfronten ist auch in bisher weniger betroffenen Gebieten wie dem Mittelmeerraum zu erwarten. Kumuluswolken werden höher und schwerer einschätzbar, was das Risiko für Flugzeuge erhöht, da

größere [Hagelbrocken in Turbinen](#) gelangen können. Zudem haben laut einer Studie der Universität Reading Luftturbulenzen im Flugverkehr in den vergangenen 40 Jahren zugenommen und werden sich gemäß den Prognosen infolge des Klimawandels auch zukünftig verstärken [6].

Stürme stellen das Verkehrssystem vor große Herausforderungen und haben in der Vergangenheit, wie beim Orkan Friederike im Jahr 2018, besonders im Schienenverkehr erhebliche Schäden verursacht. Nach Angaben des Gesamtverbands der deutschen Versicherer beliefen sich die Schadkosten auf 500 Mio. Euro [7]. Auch Orkan Sabine führte 2020 dazu, dass der Bahnverkehr kurzfristig komplett eingestellt wurde und Starts und Landungen beim Flugverkehr beeinträchtigt waren [8]. Die Gefahr bei Stürmen geht vor allem von der Vegetation entlang von Straßen und Schienen aus. Umgestürzte Bäume können den Straßenverkehr behindern oder den Bahnverkehr unterbrechen, indem sie Gleise blockieren oder Oberleitungen beschädigen.

Die fortschreitende Digitalisierung im Verkehrs- und Mobilitätssystems kann die Robustheit, z. B. durch datenbasierte Frühwarnsysteme oder vorausschauende Verkehrssteuerung gegenüber Wetterextremen und anderen Risiken, erhöhen. Gleichzeitig steigt für das dadurch komplexer werdende Infrastruktursystem das Risiko professioneller Angriffe durch [Cyberkriminalität](#). Nach Angaben der EU-Agentur für Cybersicherheit (ENISA) nehmen insgesamt Angriffe sowohl auf Fahrzeuge und Produktionsprozesse als auch auf Verkehrsinfrastrukturen, wie beispielsweise Ampelanlagen, zu und treffen vermehrt auch angrenzende Infrastruktursysteme, wie beispielsweise das Energiesystem [9]. Aus einer Studie des Bitkom e.V. geht hervor, dass neben den Branchen Chemie und Pharma sowie Maschinenbau in der Automobilbranche die dritthöchste durchschnittliche Schadenssumme je Unternehmen durch Cyberkriminalität entstanden ist. Die Angriffe können beispielsweise durch Ransomware oder als DDoS-Attacken erfolgen, welche Server durch eine Überlastung mit Anfragen zum Zusammenbruch bringen, oder durch Spionage, Datendiebstahl sowie Schädigung von Informations- und Produktionssystemen oder von Betriebsabläufen [10][9]. Die Absicherung von Produktionsanlagen und -prozessen im Infrastruktursystem Verkehr und Mobilität stellt gegenwärtig eine besondere Herausforderung dar. So werden Automatisierung und Vernetzung als Angriffsfläche für Cyberkriminalität unter anderem in der Produktion von Fahrzeugteilen und Komponenten deutlich: In einer hochtechnisierten Fertigungsanlage sind sämtliche Bereiche einer Produktionsstraße, von Sensoren bis hin

zu Fertigungsrobotern, miteinander vernetzt. Diese Vernetzung erhöht die Möglichkeiten für Cyberangriffe und bietet nicht nur ein hohes Gefährdungspotenzial für das gesamte Unternehmensnetzwerk, sondern auch für die an der Produktion beteiligten Dienstleister, die über weitere Schnittstellen mit den Fertigungsanlagen verknüpft sind [11]. So wurde beispielsweise im Jahr 2020 ein Automobilzulieferer, der Turbolader unter anderem für Audi, BMW, VW und Ferrari produziert, Opfer eines Ransomwareangriffs. Sowohl Standorte in Deutschland als auch im europäischen Ausland waren von dem Cyberangriff betroffen [12].

Neben den Produktionsanlagen stellen auch Fahrzeuge sowie die dazugehörigen digitalen Prozesse und Plattformen eine immer größere Angriffsfläche dar. Durch die zunehmende Integration von Software und komplexen Schnittstellen zwischen Mobilfunk, Software und Hardware kommt es immer häufiger dazu, dass Fahrzeuge gehackt oder Kunden der Automobilindustrie Opfer von **Cyberkriminalität** werden [13]. Auch die digitalen Systeme im öffentlichen Verkehr, einschließlich Fahrkarten- und Verkehrskoordinationssysteme, sind zunehmend anfällig für Cyberangriffe [14]. Ein Beispiel dafür in Deutschland ist die Cyberattacke auf das Verkehrsunternehmen Üstra, die zu erheblichen Einschränkungen führte: Elektronische Anzeigetafeln fielen tagelang aus und zudem funktionierte weder der elektronische Ticketverkauf, noch konnte das Unternehmen eigene Telefon- und E-Mail-Services nutzen [15]. Auch für die Schifffahrt und die Hafenwirtschaft in Deutschland stellen Cyberattacken und Hackerangriffe eine zunehmende Bedrohung dar [16]. Moderne Navigationssysteme auf Schiffen integrieren verschiedene Technologien wie satellitenbasierte Navigation, elektronische Seekarten und automatische Identifikationssysteme zunehmend in ein ganzheitliches System, das mit anderen Schnittstellen, insbesondere Hafenanlagen und Schiffsbrücken, verbunden ist. Ein Cyberangriff auf zentrale technische Steuerungsanlagen könnte die Authentizität, Vertraulichkeit und Integrität der Daten beeinträchtigen und zu Datenlecks sowie Manipulationen führen, im schlimmsten Fall sogar zu einem vollständigen Systemausfall [17].

Die zunehmende Komplexität eines **digitalisierten, vernetzten** und automatisierten Verkehrs- und Mobilitätssystems ist auch mit Blick auf das systemische Risiko **Technikversagen und eingeschränkte Technikbeherrschbarkeit** relevant. Für den reibungslosen Betrieb der Verkehrsinfrastruktur werden verstärkt elektrische Systeme zur effizienten Steuerung genutzt. Diese sind auf Informations- und

Kommunikationstechnologien angewiesen, um wesentliche Informationen für die Streckenführung und den Betrieb zu erhalten [18]. Störungen im Stromnetz beeinträchtigen die Funktionalität von Signalen, Weichenstellungen und Leitsystemen für Züge sowie computergesteuerte Autobahnsysteme. Funktionale Verknüpfungen zwischen der physischen Infrastruktur und der digitalen Steuerung des Verkehrs sind zwar vorteilhaft, die eingeschränkte Beherrschbarkeit der verschiedenen integrierten Systeme und Technologien bei gleichzeitig fehlendem Fachpersonal kann jedoch zunehmend Schäden verursachen [19]. Ein weiteres Beispiel ist die steigende Softwarekomplexität in Fahrzeugen, insbesondere im Zusammenhang mit der Automatisierung von Fahrfunktionen, die vermehrt zu softwarebedingten Rückrufen von Fahrzeugen führte. Die Sicherstellung hoher Softwarequalität ist jedoch maßgeblich für die Sicherheit des reibungslosen Fahrzeugbetriebs [20].

Vor dem Hintergrund zunehmender internationaler Konflikte steigt auch das Gefährdungspotenzial für das Verkehrs- und Mobilitätssystem, vor allem sind Transportwege verstärkt beeinträchtigt. Das systemische Risiko **geopolitische Konflikte** ist daher eng mit dem systemischen Risiko **Versorgungsengpässe** bei Energie und kritischen Rohstoffen verknüpft. So war der Automobilsektor während des russischen Angriffskriegs gegen die Ukraine mit kurzfristigen Lieferengpässen bei Kabeln und Leitungen aufgrund von Produktionsstillständen in der Ukraine konfrontiert. Zudem führten Handelssanktionen der EU gegen Russland zu Rohstoffengpässen, insbesondere bei Stahlprodukten aus Russland, der Ukraine und Weißrussland. Die steigenden Energiepreise erhöhten die Lieferkosten für **energieintensive Produkte** wie Stahl, Aluminium und Glas, was wiederum die Gesamtproduktionskosten für Fahrzeuge auf dem deutschen Markt ansteigen ließ [21]. Ein weiteres Beispiel ist die gegenwärtige Verschärfung des Nahostkonflikts, welche weitreichende Auswirkungen auf die internationale Schifffahrt und den Transport von Gütern hat: Seit Mitte November 2023 greifen jemenitische Huthi-Rebellen Handelsschiffe im Roten Meer an. Die Folge sind verzögerte Lieferungen wichtiger Vorprodukte für die deutsche Fahrzeugindustrie und dadurch Produktionsbeeinträchtigungen. Die Verzögerungen betreffen nicht nur längere Lieferwege und -zeiten, sondern bewirken auch längere Containerumschlagszeiten in den Häfen, da Fracht- und Umschlagskapazitäten nicht ausreichen, um Zeitpläne aufrechtzuerhalten [22][23].

Referenzen

1. United Nations (2021): Sustainable transport, sustainable development. Interagency report for second Global Sustainable Transport Conference 2021. United Nations, sdgs.un.org/
2. Voß, M.; Kahlenborn, W.; Porst, L.; Dorsch, L.; Nilson, E.; Rudolph, E.; Lohrengel, A.-F. (2021): Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland. Teilbericht 4: Risiken und Anpassung im Cluster Infrastruktur. Umweltbundesamt, www.umweltbundesamt.de/
3. Hänsel, S.; Herrmann, C.; Jochumsen, K.; Klose, M.; Nilson, E.; Norpoth, M.; Patzwahl, R.; Seiffert, R. (2020): Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen. Ergebnisbericht des Themenfeldes 1 im BMVI-Expertennetzwerk für die Forschungsphase 2016-2019. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, www.bmdv-expertennetzwerk.bund.de/
4. Statistisches Bundesamt (2023): Gütertransport in der Binnenschifffahrt 2022 so niedrig wie noch nie seit der deutschen Vereinigung. 27.3.2023, www.destatis.de/ (27.2.2024)
5. Deutscher Bundestag (2019): Bericht zur Risikoanalyse im Bevölkerungsschutz 2018. Drucksache 19/9521. Deutscher Bundestag, dserver.bundestag.de/
6. Prosser, M. C.; Williams, P. D.; Marlton, G. J.; Harrison, R. G. (2023): Evidence for Large Increases in Clear-Air Turbulence Over the Past Four Decades. DOI: [10.1029/2023GL103814](https://doi.org/10.1029/2023GL103814)
7. Deutsche Welle (2018): Orkan verursacht 500 Millionen Euro Schäden – DW – 19.01.2018. 19.2.2024, www.dw.com/ (27.2.2024)
8. GDV (2021): Serviceteil zum Naturgefahrenreport 2021. Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. www.gdv.de/ (27.2.2024)
9. ENISA (European Union Agency for Cybersecurity) (2023): Threat Landscape for DoS Attacks. www.enisa.europa.eu/
10. ENISA (European Union Agency for Cybersecurity) (2023b): Cybersecurity and privacy in AI – Forecasting Demand on Electricity Grids. www.enisa.europa.eu/
11. Bitkom e.V. (2020): Spionage, Sabotage und Datendiebstahl – Wirtschaftsschutz in der vernetzten Welt. Studienbericht 2020, www.bitkom.org/
12. BSI (Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik) (2023): Branchenlagebild Automotive. BSI (Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik), Bonn, www.bsi.bund.de/ (27.2.2024)
13. Bundeskriminalamt (2021): Cybercrime Bundeslagebild 2020. Bundeskriminalamt, Wiesbaden, www.bka.de/
14. Zota, V. (2023): Persönliche Daten geleakt: Toyota informiert Kunden nach Ransomware-Angriff. In: heise online, www.heise.de/ (10.12.2023)

15. Kochner, A. (2022): Cyber Security in Public Transport Vehicle Networks. In: TRONTEQ 11.09.2022, www.tronteq.com/ (7.3.2024)
16. Mutzbauer, J. (2023): Cyberattacke auf Hannoversche Verkehrsbetriebe. In: CSO 04.04.2023, www.csoonline.com/ (10.12.2023)
17. Heumer, W. (2022): Cyberwar und die Häfen. In: VDI Verlag GmbH 08.03.2022, www.vdi-nachrichten.com/ (27.02.2024)
18. Allianz Global (2023): Safety and Shipping Review 2023. An annual review of trends and developments in shipping losses and safety. AGCS (Allianz Global Corporate & Specialty), München, commercial.allianz.com/ (27.2.2024)
19. ENISA (European Union Agency for Cybersecurity) (2019): Good Practices for Security of SMART CARS. www.enisa.europa.eu/
20. Vandycke, N.; Viegas, J. M. (2022): A Systemic Approach to Transport and Mobility. In: Vandycke, N.; Viegas, J. (Hg.): Sustainable Mobility in a Fast-Changing World. Cham, S. 59–71
21. Zander, T.; Birnstill, P.; Kaiser, F.; Wiens, M.; Beyerer, J.; Schultmann, F. (2020): IT-Sicherheit im Wettstreit um die erste autonome Fahrzeugflotte. In: TATuP 29(1), S. 16–22
22. Muench, S.; Stoermer, E.; Jensen, K.; Asikainen, T.; Salvi, M.; Scapoo, F. (2022): Towards a green & digital future. Key requirements for successful twin transitions in the European Union. JRC science for policy report JRC129319, Luxembourg. DOI: [10.2760/977331](https://doi.org/10.2760/977331)
23. DIHK (2024): Sicherheitslage im Roten Meer erschwert und verteuert Seetransporte. 1.3.2024, www.dihk.de/ (1.3.2024)
24. Tagesschau (2024): DIHK warnt vor Engpässen wegen Angriffen im Roten Meer. In: tagesschau.de 12.01.2024, www.tagesschau.de/ (07.03.2024)

Gefährdungslagen im Zuge der Transformation

Die Transformation des Infrastruktursystems Verkehr und Mobilität hin zu einem nachhaltigen und gesellschaftlich akzeptierten System ist mit vielfältigen Herausforderungen verbunden. Die Reduzierung der Treibhausgasemissionen ist eine zentrale Aufgabe, um das Ziel der Klimaneutralität bis 2045 in Deutschland zu erreichen. Dies soll insbesondere durch [alternative Antriebsformen](#) wie die Elektromobilität sowie [vernetzte Mobilitätskonzepte](#) erreicht werden. Diese Transformationsprozesse bieten große Chancen, zugleich bergen sie verschiedene Risiken. Nachfolgend werden systemische Risiken beleuchtet, die sich vor allem auf das Erreichen der

Transformationsziele auswirken. Zudem werden die Auswirkungen systemischer Risiken auf die Versorgungssicherheit und den Erhalt der Mobilität im transformierten Verkehrs- und Mobilitätssystem erläutert.

Das Gefährdungspotenzial des systemischen Risikos **Pfadabhängigkeiten** für das Erreichen der Transformationsziele resultiert vor allem aus langfristigen Festlegungen der Infrastruktur. Veränderungen im Zuge der Transformation stehen ökonomische und rechtliche Pfadabhängigkeiten sowie Regulierungen im Bereich des Straßenbau- und Straßenverkehrsrechts entgegen [1], wodurch Investitionen in neue Strukturen behindert bzw. ökonomisch unattraktiv werden. Die Transformation des Verkehrs- und Mobilitätssystems führt zu einer Zunahme **vernetzter Mobilitätskonzepte**, wie beispielsweise MaaS-Angebote. Dies kann zu einer bestehenden Pfadabhängigkeiten reduzieren, indem Mobilitätsoptionen zunehmen und sich das Mobilitätsverhalten verändert. Zum anderen können bestehende Pfadabhängigkeiten aber auch verstärkt werden, insbesondere durch mangelnde Integration öffentlicher Verkehre in Mobilitätsplattformen. So geht beispielsweise eine schnelle und unkontrollierte Ausweitung von Sharingangeboten unter Umständen mit einer signifikanten Erhöhung des Individualverkehrs einher [2]. Als Folge würde der öffentliche Personennahverkehr (ÖPNV) weniger genutzt und an Bedeutung verlieren. MaaS-Angebote entfalten daher nur dann eine resilienzfördernde Wirkung, wenn sie den ÖPNV integrieren [3].

Nicht nur die Umstellung auf alternative Antriebe, sondern auch Akzeptanzaspekte sowie Fragen der sozialen Gerechtigkeit bezüglich verkehrspolitischer Maßnahmen werden vor dem Hintergrund der Transformation zunehmend relevant. Das systemische Risiko **gesellschaftliche Polarisierung** steht in engem Zusammenhang mit Veränderungen im Verkehrs- und Mobilitätssystem. Insbesondere die Förderung nachhaltiger Mobilitätsformen generiert kontroverse Debatten, u.a. zu Prioritäten bei Flächeninanspruchnahme und Investitionen sowie zu Preisgestaltung und Zugangsmöglichkeiten [4][5]. Die gesellschaftliche Akzeptanz von Veränderungen ist für das Erreichen der Transformationsziele essenziell [6][7]. Akzeptanzprobleme entstehen beispielsweise durch Einkommensunterschiede, die die Wahl der Verkehrsmittel beeinflussen und herkömmliches Mobilitätsverhalten festigen. Zunehmende Mobilitätsarmut [6] ist ein wichtiger Aspekt der Lebenshaltungskostenkrise, die im Global Risk Report 2024 [8] auf Rang 4 der akuten Krisen verankert ist. Die Bereitstellung und die Sicherung des allgemeinen Zugangs zu Mobilität (Daseinsgrundvorsorge) müssen

daher durch sozialverträgliche politische Steuerung und Regelungen der Transformation frühzeitig verankert werden. Zudem plädieren Expert/innen für einen ausgewogenen Mix an Mobilitätsangeboten [9].

Die wachsende Bedeutung von Privatunternehmen als Anbieter von Mobilitätsdiensten verstärkt das Potenzial für Gefährdungslagen durch **Machtkonzentrationen**, insbesondere in Abwesenheit entsprechender Regulierungen. Plattformen und die Plattformökonomie gewinnen an Bedeutung und beeinflussen das Infrastruktursystem maßgeblich. Private, international tätige Technologie- und Dienstleistungskonzerne wie der Google-Mutterkonzern Alphabet, Amazon oder auch Uber dominieren gegenwärtig die digitalen Mobilitätsangebote, sammeln Daten über Verkehrsaktivitäten, Bewegungsprofile und können über ihre Anwendungen sogar aktiv das Verkehrsgeschehen beeinflussen [10]. Zwar stellen auch öffentliche Verkehrsunternehmen zunehmend Plattformen zur Verfügung, diese haben jedoch meist nur begrenzte Kapazitäten [11]. Die mit diesen Entwicklungen verbundene Konzentration verleiht Plattformbetreibern eine Machtposition, die sich auf die Funktionalität des Infrastruktursystems auswirkt [9], wenn beispielsweise nur eingeschränkte Verkehrsoptionen angeboten werden.

Auch die Gefährdungslagen mit besonders hoher Entwicklungsdynamik verändern sich im Zuge der Transformation des Infrastruktursystems. Insbesondere die systemischen Risiken **Versorgungsengpässe** bei Energie und kritischen Rohstoffen sowie **geopolitische Konflikte** wandeln sich im Zuge der Transformation. Laut dem Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) gelten die extraktiven Industrien diesbezüglich als diejenigen mit dem höchsten Risikopotenzial. Demnach stehen etwa 40 % aller globalen Konflikte der letzten 60 Jahre in Verbindung mit dem Abbau von Rohstoffen, darunter viele gewalttätige Auseinandersetzungen und Kriege [12]. Die flächendeckende Einführung der **Elektromobilität** im Zuge der Mobilitätswende erfordert den Import von Batterien bzw. umfangreiche Importe von Ressourcen, wie Lithium und Kobalt, für die Produktion von Batterien, wodurch stärkere Abhängigkeiten von anderen Ländern entstehen [12]. Zudem benötigen batterieelektrische Fahrzeuge das 10-Fache an Computerchips und Mikroprozessoren im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor. Bereits im ersten Halbjahr 2021 konnte die Produktion von 2 bis 4 Mio. Fahrzeugen aufgrund von Mikrochipengpässen nicht realisiert werden [13]. Ursachen für diese weltweiten Lieferengpässe sind unter anderem Rohstoffknappheit und geopolitische Spannungen zwischen China und

den USA. Die globalen Lieferengpässe können zudem zu einer verstärkten Abhängigkeit Europas von der asiatischen Produktion führen und die Transformation hin zu einer verstärkten Elektrifizierung des Infrastruktursystems hemmen. Insgesamt lässt sich feststellen, dass die betrachteten systemischen Risiken eine Transformation des Verkehrs- und Mobilitätssystems massiv gefährden können.

Referenzen

1. Kahlenborn, W.; Clausen, J.; Behrendt, S.; Göll, E. (Hg.) (2019): Auf dem Weg zu einer Green Economy. Wie die sozialökologische Transformation gelingen kann. Neue Ökologie Band 3, Bielefeld. DOI: [978-3-8376-4493-7](https://doi.org/10.1787/16826a30-en)
2. International Transport Forum (ITF) OECD (2021): ITF Transport Outlook 2021. International Transport Forum (ITF) at the OECD. DOI: [10.1787/16826a30-en](https://doi.org/10.1787/16826a30-en)
3. IZT (2024): Resiliente Mobilität in Baden-Württemberg -. Herausforderungen für und Anforderungen an ein elektrifiziertes Mobilitätssystem der Zukunft. e-mobil BW GmbH, www.e-mobilbw.de/
4. Europäische Kommission (2019): The future of road transport : implications of automated, connected, low-carbon and shared mobility. DOI: [10.2760/668964](https://doi.org/10.2760/668964)
5. Zimmer, F. (2020): Nur das Richtige im Falschen? Mobilität zwischen Innovation und automobiler Pfadabhängigkeit. In: Baustelle Elektromobilität, S. 117–136. DOI: [10.14361/9783839451656-006](https://doi.org/10.14361/9783839451656-006)
6. Agora Verkehrswende (2023): Mobilitätsarmut in Deutschland. Annäherung an ein unterschätztes Problem mit Lösungsperspektiven für mehr soziale Teilhabe und Klimaschutz. Agora Verkehrswende, www.agora-verkehrswende.de/ (27.2.2024)
7. Wissenschaftlicher Beirat BMDV (2023): Mobilitätswende in Stadt und Land – Klimaschutz und räumliche Gerechtigkeit als Transformationsziele des Verkehrs. Bundesministerium für Digitales und Verkehr, www.bmdv.bund.de/
8. WEF (2024): The Global Risks Report 2024. 19th Edition. Insight Report, www.weforum.org/
9. Strauß, S.; Bettin, S. (2023): Digitalisierung, Vulnerabilität und (kritische) gesellschaftliche Infrastrukturen. Entwicklungsstand, Trends und zentrale Herausforderungen. Institut für Technikfolgen-Abschätzung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, epub.oeaw.ac.at/
10. Hofmann, K. M.; Hanesch, S.; Levin-Keitel, M.; Krummheuer, F.; Serbser, W. H.; Teille, K.; Wust, C. (2021): Kapitel 1 Auswirkungen von Digitalisierung auf persönliche Mobilität und vernetzte Räume –

Zusammenfassende Betrachtung der Unseens digitaler Mobilität.

DOI: [10.5771/9783748924111](https://doi.org/10.5771/9783748924111)

11. Flore, M.; Kröcher, U.; Czycholl, C. (2021): Unterwegs zur neuen Mobilität. Perspektiven für Verkehr, Umwelt und Arbeit.
DOI: [10.14512/9783962388249](https://doi.org/10.14512/9783962388249)
12. Brunnengräber, A.; Haas, T. (Hg.) (2020): Baustelle Elektromobilität. Edition Politik, Bielefeld, Germany
13. Hahne, S. (2021): Lieferengpässe bei Halbleitern – Die Macht der Mikrochips. Deutschlandfunk.de, 28.2.2024, www.deutschlandfunk.de/ (4.3.2024)

Fokusthemen

Für eine vertiefende Untersuchung im Resilienz-Check schlagen wir drei alternative Fokusthemen für das Infrastruktursystem Verkehr und Mobilität vor. Diese basieren auf der Analyse der Trends und der systemischen Risiken im Zuge des Resilienz-Radars, einschließlich der Auswertung der verschiedenen Expertenbefragungen. Die vorgeschlagenen Fokusthemen sind eng mit den identifizierten Trendclustern und der Transformation des Infrastruktursystems verbunden und besitzen eine hohe Relevanz für transformative Resilienzstrategien. In methodischer Hinsicht eignen sich die spezifischen Themenzuschnitte sowohl für die geplante Partizipation im Resilienz-Check als auch für die Entwicklung von Zukunftsszenarien.

Fokusthema 1: Elektrifizierung der Binnenschifffahrt

Die Transformation des Verkehrs- und Mobilitätssystems im Rahmen der Mobilitätswende, wie im Trendcluster [Alternative Antriebe](#) beschrieben, zeichnet sich vor allem durch eine Umstellung auf alternative Antriebe aus, insbesondere eine breite Einführung der Elektromobilität. Die Elektrifizierung der Binnenschifffahrt kann zwar die CO₂- und Schadstoffemissionen erheblich reduzieren, bringt aber zum anderen auch neue Abhängigkeiten und Risiken mit sich. Für die Szenarioentwicklung werden in diesem Themenvorschlag – inhaltlich ergänzend zum laufenden [TAB-Projekt](#) „Nachhaltige und sichere Konzepte für eine klimaverträgliche Schifffahrt“, das primär auf alternative Kraftstoffe für die Hochseeschifffahrt fokussiert – fachliche Schwerpunkte zum einen auf die Elektrifizierung des Güterverkehrs und zum anderen des Personenverkehrs fokussiert. Dabei werden verschiedene Technologieoptionen wie Elektroantrieb plus Batterie oder Brennstoffzelle plus Wasserstoff berücksichtigt, aber auch durch die Elektrifizierung erforderliche Veränderungen der Hafeninfrastruktur sowie die Schnittstellengestaltung zu anderen Verkehrsträgern.

Fokusthema 2: integrierte Mobilitätsdienstleistungen im Personenverkehr

Im Zuge der Digitalisierung wird das Verkehrs- und Mobilitätssystem zunehmend durch [digitale und verkehrsmittelübergreifende Mobilitätsangebote](#) geprägt. Der Zugang zu neuen Dienstleistungen wird über multimodale Plattformen, insbesondere im Bereich des Personenverkehrs, ermöglicht. Obwohl eine Diversifizierung von Mobilitätsangeboten erhebliche Vorteile bietet und durch Mobilitätsdaten das Infrastruktursystem insgesamt resilienter gestaltet werden kann, bringen die neuen Anwendungen auch spezifische Risiken mit sich. Für die Szenarioentwicklung werden in diesem Themenvorschlag fachliche Schwerpunkte zum einen im Bereich der Datengovernance gesetzt, da mit der zunehmenden Digitalisierung eine vermehrte Erhebung, Sammlung und kommerzielle Nutzung von Mobilitätsdaten einhergeht. Zum anderen werden neue Geschäftsmodelle und Akteurskonstellationen fokussiert, da On-demand-Lösungen, Shared-Mobility und zunehmende MaaS-Angebote insbesondere neue Möglichkeiten der Wertschöpfung eröffnen und Potenziale zur Veränderung des Mobilitätsverhaltens generieren.

Fokusthema 3: Anschlussverkehre durch automatisiertes und autonomes Fahren

Das Infrastruktursystem ist zunehmend durch [automatisierte und autonome Verkehre](#) gekennzeichnet. Mit der breiten Einführung dieser Technologien sind zum einen hohe Effizienzpotenziale, eine stärkere Nutzung des öffentlichen Nahverkehrs oder auch eine Verringerung des Individualverkehrs möglich, zum anderen jedoch auch neue Risiken verbunden. Diese Risiken werden in gegenwärtigen Diskussionen zu Sicherheitsbedenken der Bevölkerung hinsichtlich Straßensicherheit, Privatsphäre und Datenschutz adressiert. Für die Szenarioentwicklung werden thematische Schwerpunkte auf automatisierte und autonome Anschlussverkehre zum einen in urbanen und zum anderen in ländlichen Räumen mit ihren unterschiedlichen Rahmenbedingungen, Mobilitätsbedarfen, Akteurskonstellationen und Zeithorizonten der Implementierung fokussiert.

Methodik und Vorgehen

Die Umsetzung des Resilienz-Radars erfolgt in drei aufeinander aufbauenden Arbeitsphasen. In allen Phasen wird die Expertise interner und externer Expert/innen einbezogen.

In der ersten Phase wurden vor allem Foresight- und TA-Studien im Umfeld der ausgewählten Infrastruktursysteme erfasst und analysiert. Hierbei wurden insbesondere mittel- bis langfristige Trends identifiziert, die nachweisbare Auswirkungen auf die Infrastruktursysteme haben. Ergänzend wurden unter Berücksichtigung der Ergebnisse des [TA-Projekts](#) „Krisenradar – Resilienz von Gesellschaft, Politik und Wirtschaft durch Krisenvorhersage stärken“ relevante wissenschaftliche Quellen zur Analyse von systemischen Risiken ausgewertet. Diese können eine Gefährdung von Gesellschaften oder Wirtschaftssystemen als Ganzes zur Folge haben und beinhalten damit grundsätzlich auch die Gefahr, dass Funktionsfähigkeit und Stabilität von Infrastruktursystemen erheblich beeinträchtigt werden, wenn sich diese Risiken verwirklichen.

Die Identifikation aufkommender soziotechnischer Trends erfolgte zusätzlich durch den Einsatz von Software- und KI-Technologien. Dafür wurde ein Quellenpool aufgebaut, der einschlägige Datenbanken (z.B. EPTA, ORBIS, Knowledge4Policy, OpenTA), Publikationen (Foresightstudien, Trendberichte, Konferenzsammelbände und Preprints), wissenschaftliche Plattformen (z.B. ScienceDaily) sowie journalistischen Hintergrundanalysen (Tagesspiegel Background, Heise online) umfasst. Die neuesten Veröffentlichungen wurden über eine zentrale Plattform semiautomatisch und kontinuierlich abgerufen. Das Team sichtete die Beiträge regelmäßig und bewertete deren Relevanz für die ausgewählten Infrastruktursysteme. Ergänzend wurde nach Innovationen mithilfe einer Medienanalysesoftware mit Zugang zu 150 Mio. Onlinequellen gesucht. Dabei lag der Fokus vor allem auf Tages- und Wochenzeitungen sowie Onlinenews.

In der zweiten Phase wurden Interviews mit ausgewählten Expert/innen geführt, um deren Fachwissen, Einschätzungen und Meinungen zu wesentlichen Trends und Herausforderungen sowie zu Wirkungszusammenhängen im Kontext systemischer Risiken für die Infrastruktursysteme zu erfassen. Für die Interviews wurde ein einheitlicher Leitfaden und Fragenkatalog erstellt. Auf den Ergebnissen der Interviews aufbauend wurden moderierte infrastrukturspezifische Workshops mit ausgewählten Expert/innen durchgeführt. Hier wurden

erste Arbeitsergebnisse zum Systembild des jeweiligen Infrastruktursystems sowie zu relevanten Trends und möglichen Folgen von systemischen Risiken vorgestellt und diskutiert. Abschließend erfolgte eine Einschätzung hinsichtlich politischer Relevanz und möglicher Vertiefungsthemen. Die Antworten der Befragten sowie weitere Kommentare, Hinweise und detaillierte Ausführungen wurden während der Interviews und Workshops protokolliert und die Ergebnisse anschließend qualitativ ausgewertet.

In der dritten Phase wurde für jedes der Infrastruktursysteme eine explorative Onlineerhebung unter Einbeziehung des Expertenpanels mithilfe der Software SoSci Survey durchgeführt. Aufgabe war es, auf Grundlage der vorangegangenen Schritte Trends auszuwählen und hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Verletzlichkeit und Resilienz des genannten Infrastruktursystems zu bewerten. Außerdem wurden die insgesamt etwa 80 Expert/innen dazu befragt, welche Trends in den nächsten 10 Jahren zu einer erhöhten Resilienz der Infrastruktursysteme beitragen könnten und welche Trends die Transformation der Infrastruktursysteme in Richtung Klimaneutralität besonders hemmen. Darüber hinaus sollten sie einschätzen, wie derzeit der Grad der Robustheit des jeweiligen Infrastruktursystems in Bezug auf prioritäre systemische Risiken eingeschätzt wird. Abschließend wurde für jedes System erfragt, auf welche Schwerpunktthemen die Politik in den nächsten 5 Jahren in Bezug auf die Resilienz des Infrastruktursystems vorrangig fokussieren sollte. Der quantifizierbare Teil der Ergebnisse wurde statistisch ausgewertet, die Kommentare, Hinweise und detaillierten Ausführungen einer qualitativen Analyse unterzogen.

Die Resultate aller drei Arbeitsphasen wurden abschließend integrativ analysiert und in dem vorliegenden Foresight-Report zusammengefasst.

Autorinnen und Autoren

Das Resilienz-Radar sowie der Foresight-Report sind eine gemeinsame Aktivität des TAB-Betreibers ITAS zusammen mit dem Konsortialpartner IZT. Verantwortlich für die Inhalte sind die [folgenden Wissenschaftler/innen](#). Bei inhaltlichen Fragen zum Foresight-Report wenden Sie sich bitte an Michaela Evers-Wölk oder Christoph Kehl.

Beteiligte Expert/innen

Die Umsetzung des [Resilienz-Radars](#) erfolgt in drei aufeinander aufbauenden Arbeitsphasen. In allen Phasen wird die Expertise interner und externer Expert/innen einbezogen. Für die Analyse des Infrastruktursystems Energie wurden u.a. die [folgenden Fachleute](#) im Rahmen von leitfadengestützten Fachgesprächen, moderierten Gruppendiskussionen oder einer explorativen Online-Erhebung eingebunden.

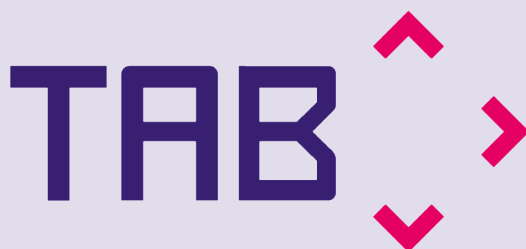
Zitationsvorschlag

Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) (2024): Foresight-Report zum Infrastruktursystem Verkehr und Mobilität (Autor/innen: Bledow, N.; Eickhoff, M.; Evers-Wölk, M.; Kahlisch, C.; Kehl, C.; Nolte, R.; Rioussset, P.). Berlin. <https://foresight.tab-beim-bundestag.de/reports/verkehr-und-mobilitat>

Das TAB analysiert im Auftrag des Deutschen Bundestages umfassend und vorausschauend die Potenziale wissenschaftlich-technischer Entwicklungen und ihre Auswirkungen auf die Gesellschaft.

Organisation

Betreiber: [ITAS](#) im [KIT](#)
 Partner: [IZT](#) und [iit](#) in der [VDI/VDE-IT](#)
 Auftraggeber: [Deutscher Bundestag](#)
 Steuerungsgremium: [Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung](#)



Kontakt

[Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag \(TAB\)](#)

[Mediananfragen](#)