



GÜTERVERKEHR ZWISCHEN INFRASTRUKTUR- ANFORDERUNGEN UND DEKARBONISIERUNG

I. Einleitung

II. Ausgangslage: Güterverkehr in Deutschland und Europa

1. Struktur des bestehenden Güterverkehrs
2. Herausforderung: Verkehrsinfrastruktur
3. Herausforderung: Dekarbonisierung
4. Regulatorischer Rahmen für die Dekarbonisierung des Güterverkehrs

III. Strategien zur Dekarbonisierung des Güterverkehrs

1. Gütertransporte auf Schiene und Wasserstraße verlagern
2. Straßengüterverkehr dekarbonisieren

IV. Maßnahmen: Reformoptionen für den Güterverkehr der Zukunft

1. Hemmnisse bei der Modernisierung der Infrastruktur abbauen
2. Schienengüterverkehr stärken
3. Energieinfrastruktur für alternative Antriebe aufbauen

Eine andere Meinung: Mit langfristiger Perspektive ein breites Technologie-Portfolio stärken

Anhang

Literatur

WICHTIGSTE BOTSCHAFTEN

- Der zunehmend schlechtere Zustand der Straßen- und Schieneninfrastruktur belastet die wirtschaftliche Entwicklung in Deutschland und macht höhere Investitionen erforderlich.
- Eine Verlagerung des Güterverkehrs von der Straße auf die Schiene ist aufgrund von Kapazitätsengpässen und großteils getrennten Märkten zwischen Straßen- und Schienengüterverkehr nur begrenzt möglich.
- Für eine schnelle und effiziente Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs sollte die Politik zunächst auf den bedarfsgerechten Aufbau der Ladeinfrastruktur für batterieelektrische LKW fokussieren.

DAS WICHTIGSTE IN KÜRZE

Der **schlechte Zustand der Verkehrsinfrastruktur** führt zunehmend zu Staus auf Autobahnen und einer geringen Zuverlässigkeit im Schienenverkehr und beeinträchtigt so den Güterverkehr und die Wirtschaftsaktivität. Das absehbar wachsende Transportaufkommen lässt die Belastung der Infrastruktur weiter steigen, was eine **umfangreiche Ertüchtigung erforderlich** macht. Gleichzeitig muss der **Güterverkehr dekarbonisiert** werden.

Die **Modernisierung** und der Ausbau der Verkehrsinfrastruktur in Deutschland sollten vor allem **durch eine stärkere Nutzerfinanzierung** der Infrastruktur, z. B. **durch eine fahrleistungsabhängige PKW-Maut**, finanziert werden. Eine feste Zuweisung von Mitteln an Investitionsfördergesellschaften könnte die Infrastrukturausgaben verstetigen und für Planungssicherheit sorgen. Nicht-monetäre Hemmnisse wie Planungs- und Verwaltungshemmnisse müssen abgebaut werden. Eine **stärkere Qualitätsorientierung in Vergabeverfahren** könnte zur Verbesserung der Verfahren beitragen.

Den **Güterverkehr von der Straße auf die Schiene zu verlagern**, um die Dekarbonisierung zu beschleunigen, ist **nur begrenzt möglich**. Potenziale dafür sollten gestärkt und genutzt werden. Unabhängig davon müssen Kapazität und Qualität im Schienennetz erhöht werden. Eine strikte Abtrennung einer Infrastrukturgesellschaft von den anderen Teilen des DB-Konzerns kann die Anreize dafür stärken. Eine **europäische Abstimmung** beim Schienengüterverkehr, z. B. durch die europaweite Einführung der Digitalen Automatischen Kupplung, **würde die Effizienz im grenzüberschreitenden Güterverkehr steigern**.

Der LKW wird selbst im klimaneutralen Güterverkehr das dominierende Transportmittel bleiben. Der nationale CO₂-Preis und die CO₂-Komponente der LKW-Maut, perspektivisch das EU-ETS II (EU Emissions Trading System II), schaffen technologie neutrale Anreize für einen Wechsel zu alternativen Antrieben. Batterieelektrische LKW haben die höchste Marktreife. Mit ihnen können bereits beim heutigen Strommix Emissionen reduziert werden. Deshalb sollte der **Fokus zunächst auf einer Beschleunigung der Marktdurchdringung von batterieelektrischen LKW** liegen, da nur so deutliche Fortschritte bei der Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs bis zum Jahr 2030 zu erreichen sind. **Voraussetzung dafür** ist der **schnelle Aufbau der Ladeinfrastruktur**. Um private Investitionen in die Ladeinfrastruktur anzureizen, müssen insbesondere schnell und unbürokratisch Flächen für den Aufbau von LKW-Ladesäulen sowie zeitnah digitale Informationen zu den Netzkapazitäten möglicher Ladestandorte bereitstehen.

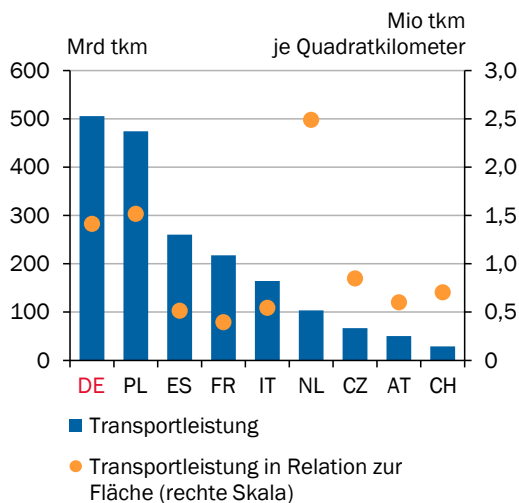
I. EINLEITUNG

60. Ein günstiger, schneller und **zuverlässiger Güterverkehr ist Voraussetzung für eine moderne arbeitsteilige Volkswirtschaft** mit komplexen Wertschöpfungsketten (Hummels, 2007; NCFRP, 2012). Er leistet damit wichtige Beiträge zur Produktivität einer Volkswirtschaft. [↪ KASTEN 12](#) Die Entwicklung des Güterverkehrsaufkommens ist eng verbunden mit der wirtschaftlichen Entwicklung insgesamt. [↪ ABBILDUNG 28 RECHTS](#)
61. **In Deutschland** finden absolut und **im Verhältnis zur Fläche viele Gütertransporte** statt. [↪ ABBILDUNG 28 LINKS](#) Die Bedeutung von Transporten für eine Volkswirtschaft hängt einerseits von der Struktur der Wirtschaft und andererseits von der Größe des Landes und seiner geografischen Lage ab. In dienstleistungsstarken Volkswirtschaften, wie beispielsweise Japan oder dem Vereinigten Königreich, spielen Gütertransporte für die Wertschöpfung eine vergleichsweise geringere Rolle. In Deutschland hingegen, wo das Verarbeitende Gewerbe und damit einhergehende Vorprodukte einen verhältnismäßig hohen Anteil der Wertschöpfung ausmachen, ist der Güterverkehr bedeutender. [↪ ZIFFER 75](#) [↪ KASTEN 12](#) Im Jahr 2022 machte der Wirtschaftszweig Verkehr und Lagerei 4,9 % der deutschen Bruttowertschöpfung aus. In der Europäischen Union (EU) lag er im selben Jahr

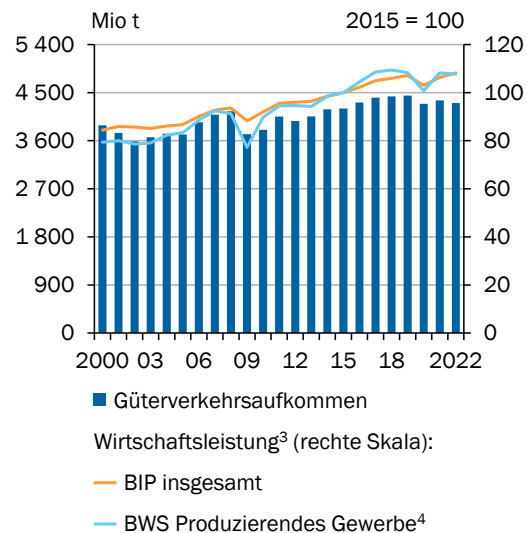
[↪ ABBILDUNG 28](#)

Wirtschaftliche Bedeutung des Güterverkehrs¹

Heterogene Bedeutung des Güterverkehrs in ausgewählten europäischen Volkswirtschaften²



Güterverkehr und wirtschaftliche Entwicklung sind in Deutschland eng korreliert



1 – Umfasst inländische, grenzüberschreitende und Transitfracht. 2 – DE-Deutschland, PL-Polen, ES-Spanien, FR-Frankreich, IT-Italien, NL-Niederlande, CZ-Tschechien, AT-Österreich, CH-Schweiz. Durchschnittswerte der Jahre 2017 bis 2021, außer für Spanien (bis 2020). 3 – Preisbereinigte Werte, Kettenindex. Gemäß der Klassifikation der Wirtschaftszweige, Ausgabe 2008 (WZ 2008). 4 – Ohne Baugewerbe.

Quellen: BMDV, FAO, OECD, Statistisches Bundesamt, eigene Berechnungen
© Sachverständigenrat | 24-101-04

mit 5,2 % noch etwas höher, was auf die besonders hohen Anteile an der Bruttowertschöpfung in osteuropäischen Ländern zurückzuführen ist.

62. Für einen auch in Zukunft verlässlichen und leistungsstarken Güterverkehr in Deutschland ist die Bewältigung von **zwei Herausforderungen** von zentraler Bedeutung. Zum einen gilt es, die **veraltete Verkehrsinfrastruktur zu modernisieren und auszubauen**. Zum anderen muss der **Güterverkehr dekarbonisiert** werden. Bei den dringend anstehenden Investitionen zum Erhalt und Ausbau der Verkehrsinfrastruktur müssen deshalb die Anforderungen des klimaneutralen Güterverkehrs berücksichtigt werden. Durch seine zentrale geografische Lage mit vielen wirtschaftsstarken Nachbarn ist Deutschland zudem ein wichtiger Transitstaat für den Gütertransport innerhalb Europas. Daher ist es wichtig, dass der Aufbau der Lade- und Betankungsinfrastruktur für LKW [↪ ZIFFERN 140 FF.](#) sowie der Schieneninfrastruktur [↪ ZIFFERN 184 FF. ANHANG](#) mit den Nachbarstaaten koordiniert wird.
63. **Verkehr verursacht externe Kosten.** [↪ KASTEN 10](#) Der Güterverkehr ist für ein Drittel der Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) des Verkehrs und somit für etwa 8 % der gesamten THG-Emissionen in Deutschland verantwortlich. Bislang stiegen mit einer Zunahme der Verkehrsleistung auch die THG-Emissionen. **Um das Ziel der Klimaneutralität bis Mitte des Jahrhunderts zu erreichen**, muss dieser Zusammenhang durchbrochen werden. [↪ ZIFFER 80](#) Für den Güterverkehr sind **drei komplementäre Strategien** denkbar, die jedoch unterschiedlich erfolgversprechend sind.

Erstens könnten **Transporte vermieden** werden. Empirisch zeigt sich allerdings, dass die Nachfrage nach straßengebundenen Transporten wenig preissensitiv reagiert (de Jong et al., 2010; Musso et al., 2013; Wang und Zhang, 2017; Blechschmidt et al., 2022) und zudem ein enger Zusammenhang zwischen Güterverkehrsleistung und wirtschaftlicher Entwicklung besteht, weswegen eine umfassende Vermeidung nicht zu erwarten ist. [↪ KASTEN 13](#) [↪ ABBILDUNG 28](#) **Zweitens** können Gütertransporte von der Straße **auf weniger emissionsintensive Verkehrsträger** wie die Schiene **verlagert werden**. [↪ ZIFFER 71](#) Das nachfrage-seitige Verlagerungspotenzial ist jedoch begrenzt, da LKW einen grundsätzlich anderen Transportmarkt bedienen als Bahn und Binnenschiffe. [↪ ZIFFERN 93 FF.](#) Zudem fehlen Schienenkapazitäten. [↪ ZIFFERN 98 FF.](#) Prognosen lassen daher erwarten, dass auch der klimaneutrale Güterverkehr noch maßgeblich vom LKW geprägt sein wird. [↪ ZIFFER 76](#) [↪ ABBILDUNG 56 ANHANG](#) **Drittens** kann der **Wechsel auf emissionsarme Antriebstechnologien im Straßengüterverkehr** die THG-Emissionen je Tonnenkilometer reduzieren. [↪ ZIFFERN 102 FF.](#) Diese Strategie bietet unter den aktuellen Voraussetzungen den größten Hebel für die Dekarbonisierung des Güterverkehrs. Auch sie ist allerdings mit großen Herausforderungen verbunden, insbesondere dem Aufbau einer entsprechenden Lade- oder Betankungsinfrastruktur inklusive des zugehörigen Netzausbaus. [↪ ZIFFERN 116 FF.](#)

64. **Marktorientierte Steuerungsinstrumente** wie der nationale CO₂-Preis im Verkehrssektor (nationales Emissionshandelssystem, nEHS), der zukünftig im erweiterten europäischen Emissionshandelssystem EU-ETS II (EU Emissions

Trading System II) aufgehen soll, [↘ ZIFFER 85](#) und die CO₂-basierte LKW-Maut [↘ ZIFFER 87](#) **zielen auf eine Internalisierung der externen Effekte des Güterverkehrs ab** und liefern technologie neutrale Anreize zu dessen Dekarbonisierung. Voraussetzung ist, dass die Ausgestaltung dieser Instrumente einen ausreichend hohen Anreiz zur Erreichung der Klimaneutralität setzt. Unter dem bislang im nEHS festgelegten Preiskorridor dürften die Klimaziele verfehlt werden (Rickels et al., 2023). Zwar könnten sich im EU-ETS II zukünftig höhere Preise einstellen. Es fehlt jedoch insgesamt an Planungssicherheit über die zukünftigen CO₂-Preise im Verkehrssektor (SVR Wirtschaft, 2023). [↘ ZIFFER 86](#)

Selbst wenn der CO₂-Preis den externen Kosten der THG-Emissionen entspricht, können verschiedene **Marktunvollkommenheiten die Dekarbonisierung bremsen**. Beispielsweise können Netzwerkexternalitäten und Koordinationsprobleme den Aufbau einer Lade- und Tankinfrastruktur und den Umstieg auf emissionsarme Antriebe bremsen oder gar verhindern. [↘ ZIFFER 151](#) Darüber hinaus entstehen bei Forschung und Entwicklung (FuE) zu neuen Antrieben typischerweise Wissensexternalitäten, die zu ineffizient niedrigen FuE-Ausgaben führen. Staatliche Eingriffe sollten darauf fokussieren, solche Marktunvollkommenheiten gezielt zu adressieren, z. B. indem staatliche Stellen eine Koordinierungsfunktion übernehmen oder Forschungsaktivitäten fördern.

65. **Für einen leistungsstarken und zukunftssicheren Güterverkehr** muss die **veraltete Verkehrsinfrastruktur modernisiert und ausgebaut** werden. Dafür müssen die Finanzierung notwendiger Investitionen sichergestellt [↘ ZIFFERN 127 FF.](#) und die Planungs- und Genehmigungsverfahren vereinfacht werden. [↘ ZIFFERN 129 FF.](#) Wo **Verlagerungspotenziale von der Straße auf die Schiene** bestehen, können diese nur gehoben werden, wenn Kapazität und Effizienz des Schienengüterverkehrs gesteigert werden. [↘ ZIFFERN 131 FF.](#) Die **Behhebung von Fehlanreizen bei der Durchführung von Instandhaltungsmaßnahmen in der Schieneninfrastruktur** stellt einen wichtigen Hebel zur nachhaltigen Verbesserung der Schieneninfrastruktur dar. [↘ ZIFFER 136](#)
66. **Größtes Hemmnis für den Hochlauf alternativer Antriebstechnologien** im Straßengüterverkehr stellt die bislang **fehlende Lade- oder Betankungsinfrastruktur für emissionsarme LKW** dar. Monetäre und nicht-monetäre Hemmnisse schränken deren Aufbau ein. [↘ ZIFFERN 140 FF.](#) Die Rahmenbedingungen für private Investitionen in Ladeinfrastruktur können verbessert werden, indem öffentliche Flächen schnell und unbürokratisch verfügbar gemacht und Informationen zu geeigneten Standorten und Netzkapazitäten digital und kostenfrei bereitstehen. [↘ ZIFFERN 142 FF.](#) Staatliche Fördermittel können Koordinations- und Netzwerkexternalitäten [↘ ZIFFER 151](#) adressieren und so den flächendeckenden Aufbau von Lade- und Tankinfrastruktur beschleunigen. Durch die Neuaufstellung des Klima- und Transformationsfonds (KTF) im Zuge des BVerfG-Urteils wurden öffentliche Mittel für den Aufbau der Lade- und Tankinfrastruktur gekürzt. [↘ PLUSTEXT 5](#) Daher ist es nun besonders wichtig, verfügbare Mittel zu priorisieren und zielgerichtet dort einzusetzen, wo sie eine besonders große Hebelwirkung erzielen können.

67. Verschiedene Gründe sprechen dafür, **verfügbare Planungskapazitäten und öffentliche Mittel kurzfristig zunächst darauf zu konzentrieren**, die direkte Stromnutzung im Straßengüterverkehr für breite Marktsegmente zu ermöglichen und **den bedarfsgerechten Aufbau von Ladeinfrastruktur für batterieelektrische LKW (BE-LKW) sicherzustellen**. Der BE-LKW verfügt derzeit über die höchste Marktreife für den Straßengüterverkehr. Aufgrund erheblicher Technologiesprünge von Batterie- und Ladetechnik dürften sich, bis auf wenige Nischenanwendungen, künftig alle Einsatzprofile des Straßengüterverkehrs durch BE-LKW abdecken lassen. [↪ ZIFFER 104](#)

Der **breite Einsatz anderer emissionsarmer Antriebstechnologien** wie Brennstoffzellen-LKW (Fuel Cell Electric-LKW, FCE-LKW) und Oberleitungs-Hybrid-LKW ist **zwar technisch möglich**, jedoch **aufgrund** noch bestehender **technischer und marktlicher Hürden nicht zeitnah zu erwarten**. [↪ ZIFFER 105](#) [↪ KASTEN 15](#) Der **BE-LKW kann hingegen mit heute** verfügbaren Reichweiten und Ladetechnologien und zu heutigen Energiepreisen den Nah- und Verteilverkehr, und damit bereits **einen Großteil des Straßengüterverkehrs, wirtschaftlicher abdecken als der Diesel-LKW** [↪ ZIFFERN 108 FF.](#) und bereits mit dem heutigen Strommix Emissionsreduktionspotenziale realisieren. [↪ ZIFFER 106](#) Im Sinne einer volkswirtschaftlich effizienten Dekarbonisierung sollten diese vergleichsweise einfach zu hebenden Potenziale deshalb vorrangig erschlossen werden. Es bestehen zudem hohe Synergieeffekte mit dem Hochlauf des BE-PKW sowie beim Netzausbau für Lademöglichkeiten entlang der Autobahnen. Es stellt deshalb eine **No-regret-Maßnahme** dar, dem Hochlauf von BE-LKW im privaten und staatlichen Handeln die höchste Priorität einzuräumen.

68. **Dort wo die technischen und marktlichen Hürden für einen Markthochlauf noch höher sind** als beim BE-LKW, insbesondere bei FCE-LKW und dem Einsatz von synthetischen Kraftstoffen, sollte der Fokus hingegen auf einer **technologieneutralen Forschungsförderung** und der **Erprobung schwieriger zu elektrifizierender Anwendungsfälle im Straßengüterverkehr** liegen. So bleibt die Option offen, zu einem späteren Zeitpunkt diese Antriebstechnologien parallel zum BE-LKW einzusetzen, sofern dies bei bestimmten Einsatzprofilen aus technischen Gründen erforderlich sein sollte oder aus Gründen der Wirtschaftlichkeit geboten wäre. [↪ ZIFFERN 104 UND 108 FF.](#) Für solche Anwendungsfälle bereits kurzfristig eine öffentlich geförderte flächendeckende Wasserstoff-Tankstelleninfrastruktur für FCE-LKW aufzubauen, ist hingegen wenig zielführend. Hierfür bestehen noch zu große technische und marktliche Unsicherheiten. [↪ KÄSTEN 15 UND 17](#) Zudem könnten solche schwer zu elektrifizierenden Nischenanwendungen beispielsweise auch über mobile Wasserstoff-tankstellen oder Betriebstankstellen abgedeckt werden oder durch synthetische Kraftstoffe dekarbonisiert werden, die auf die bestehende Betankungsinfrastruktur zurückgreifen können. Da der Hochlauf der Lade- und Betankungsinfrastruktur für emissionsarme Antriebe europäisch koordiniert erfolgen muss, sollte sich Deutschland im Rahmen der Zwischenevaluation der EU-Verordnung zum Aufbau einer Infrastruktur für alternative Kraftstoffe (AFIR) Ende des Jahres 2024 daher dafür einsetzen, dass die Bedarfe der mit der AFIR regulierten Infrastruk-

turen für alternative Kraftstoffe, die bereits bis zum Jahr 2030 den flächendeckenden Aufbau einer Wasserstoff-Tankstelleninfrastruktur für LKW vorsieht, neu bewertet werden. [↪ ZIFFER 159](#)

II. AUSGANGSLAGE: GÜTERVERKEHR IN DEUTSCHLAND UND EUROPA

69. Der absehbare Anstieg des Güterverkehrs in Deutschland [↪ ZIFFER 76](#) stellt diesen vor **zwei große Herausforderungen**. Einerseits wird die ohnehin **überlastete Infrastruktur** künftig **noch stärker belastet** als bisher. Die Verkehrsinfrastruktur muss daher modernisiert und ausgebaut werden. Andererseits dürften durch das höhere Verkehrsaufkommen die **externen Kosten des Güterverkehrs steigen**. Insbesondere werden die THG-Emissionen steigen, wenn keine Anstrengungen zur Dekarbonisierung unternommen werden. [↪ ZIFFER 81](#)

1. Struktur des bestehenden Güterverkehrs

70. Die **Straße ist mit weitem Abstand der dominierende Verkehrsträger** des Güterverkehrs. Etwa 70 % des Güterverkehrsaufkommens [↪ PLUSTEXT 1](#) wurden im Jahr 2022 durch LKW transportiert. [↪ ABBILDUNG 29 LINKS](#) Etwa 14 % des Güterverkehrsaufkommens wurden durch ausländische LKW transportiert. Dieser Anteil hat in den vergangenen zehn Jahren um etwa 3 Prozentpunkte zugenommen. Da ausländische LKW längere Strecken fahren als deutsche LKW, ist ihr Anteil gemessen an der Güterverkehrsleistung, also dem Güterverkehrsaufkommen pro zurückgelegter Entfernung, höher und stärker gewachsen. [↪ ABBILDUNG 29 RECHTS](#) Über die Hälfte der von deutschen LKW transportierten Fracht in Tonnen wurde im Jahr 2022 weniger als 50 km weit bewegt. Nur 9 % des Güterverkehrsaufkommens wurden im Jahr 2022 durch die Schiene erbracht und weniger als 5 % durch den Binnenschiffsverkehr. Da Schiene und Wasserstraße längere Transportstrecken bedienen, fällt ihr Anteil gemessen an der Güterverkehrsleistung höher aus.



[↪ PLUSTEXT 1](#)

Begrifflichkeiten: Güterverkehr in Deutschland

Der Güterverkehr umfasst den Transport von Gütern auf Straßen, Schienen, der Wasserstraße, in der Luft oder in Rohrfernleitungen. Als **Modal Split** wird in der Verkehrsstatistik die Verteilung des Güterverkehrsaufkommens (in Tonnen) oder der Güterverkehrsleistung (Aufkommen pro zurückgelegter Entfernung, ausgedrückt in Tonnenkilometern) auf verschiedene Verkehrsmittel bezeichnet. Der inländische Güterverkehr umfasst alle Transportwege, die innerhalb Deutschlands zurückgelegt werden; das umfasst inländische, grenzüberschreitende sowie Transitfracht. Der Straßengüterverkehr wird typischerweise unterteilt in **Güternahverkehr** (bis 50 km), **Verteilverkehr** (über 50 bis 150 km) und **Güterfernverkehr** (über 150 km). Der Transport von Gütern auf der Straße findet durch LKW statt. Unterschieden wird zwischen leichten LKW (bis 7,5 Tonnen), mittelschweren LKW

(bis 13,5 Tonnen) und schweren LKW (bis 40 Tonnen). Leichte und mittelschwere LKW werden vorwiegend im Nah- und Verteilverkehr eingesetzt, schwere LKW vor allem im Güterfernverkehr.

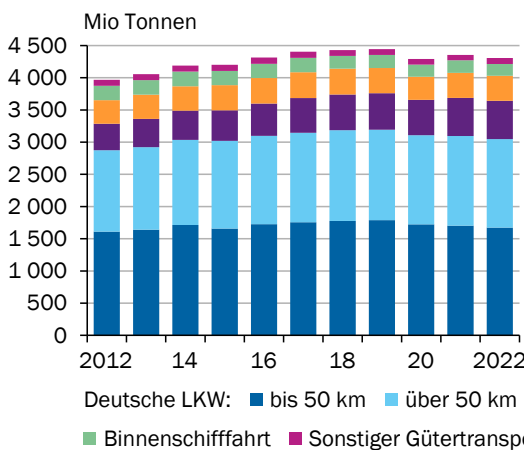
71. **Je nach Güterart werden unterschiedliche Transportmittel vorrangig genutzt.** ↘ **ABBILDUNG 30** Durch die Energiewende dürfte die Nachfrage nach Massengütern wie Kohle, Erdöl und Koks sinken, die zumeist per Schiene oder Binnenschiff transportiert werden (Repenning et al., 2023). Das dürfte Kapazitäten bei Bahn- und Wasserstraßen freisetzen (Blechschmidt et al., 2022). ↘ **ABBILDUNG 30** Diese dürften jedoch künftig für erhebliche Zuwächse beim Transport anderer Massengüter, wie Ammoniak oder Wasserstoff, benötigt werden (Arlt et al., 2023; DWSV, 2023; Reiner, 2023).

72. Für die meisten Waren erfolgt der Großteil der Transporte auf der Straße. ↘ **ABBILDUNG 30** **Die meisten Transporte** in Deutschland wie auch in Europa finden **über Transportdistanzen unter 200 km** (75 %) bzw. mit einem Sendungsgewicht von bis zu 30 t (85 %) statt (Blechschmidt et al., 2022). ↘ **ABBILDUNG 55 ANHANG** Dafür ist der Transport per Schiene anstelle eines Transports per LKW zum großen Teil nicht möglich oder aktuell kaum wettbewerbsfähig (UBA, 2022). Nur wenige Betriebe haben einen direkten Zugang zum Schienennetz. Der Transport auf der letzten Meile muss somit per LKW stattfinden (DB, 2022). Daher sind der Schienengüterverkehr und der Straßengüterverkehr grundsätzlich als getrennte Märkte zu betrachten (Bundeskartellamt, 2005).

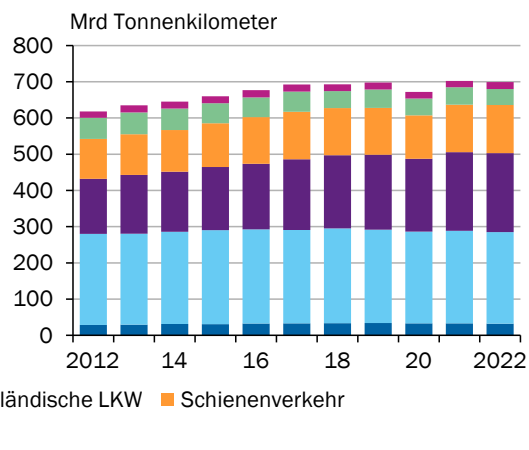
↘ **ABBILDUNG 29**

Güterverkehrsaufkommen und Güterverkehrsleistung nach Transportmitteln¹

Der LKW dominiert das Güterverkehrsaufkommen in Deutschland²



Mit längeren Strecken steigt der Anteil eines Transportmittels an der Güterverkehrsleistung⁴



1 – Ohne Seeschifffahrt. 2 – Umfasst inländische, grenzüberschreitende und Transitfracht. Bei der Entfernung in km werden lediglich die innerhalb des Bundesgebiets zurückgelegten Strecken berücksichtigt. 3 – Luftverkehr (Fracht und Luftpost, einschließlich Doppelzählungen im Umladeverkehr) und Rohrfernleitungen. 4 – Bezieht sich auf die im Bundesgebiet zurückgelegte Entfernung. Die Verkehrsleistungen von der Grenze zum Empfangsort im Ausland sowie vom Herkunftsort im Ausland bis zur Grenze der Bundesrepublik Deutschland sind hier nicht nachgewiesen.

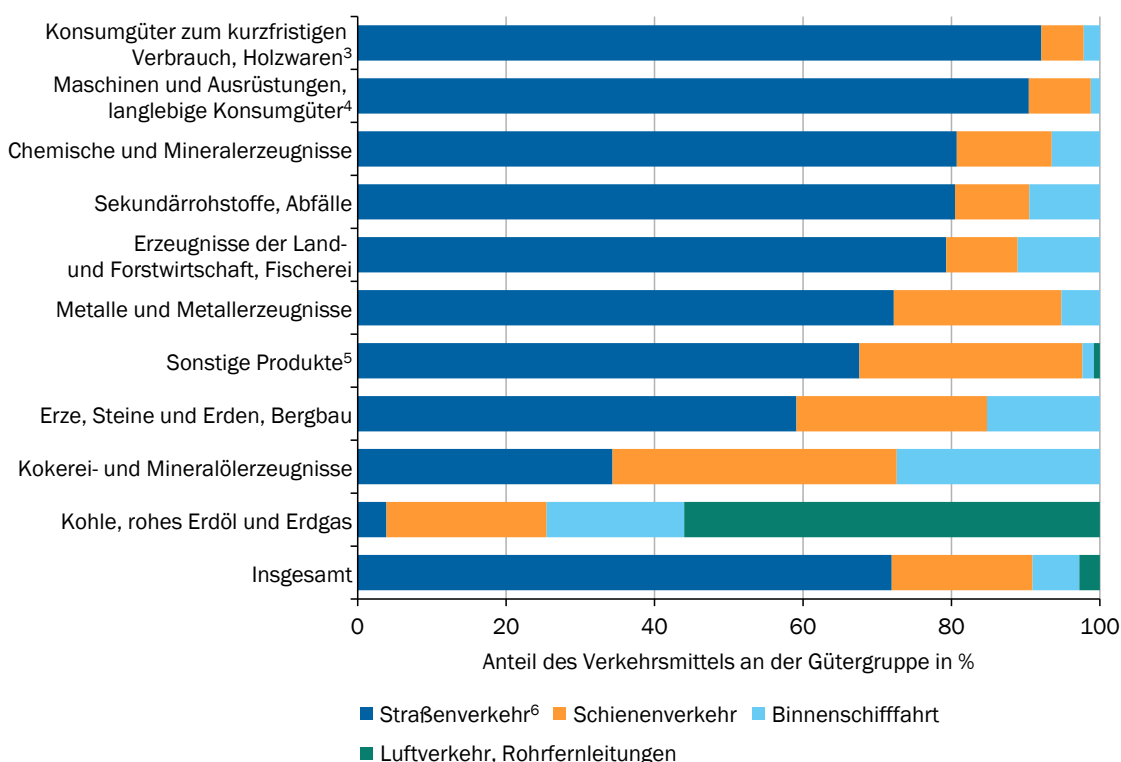
Quellen: BMDV, eigene Berechnungen
© Sachverständigenrat | 24-014-03

73. **Zwischen den Mitgliedstaaten der EU bestehen erhebliche Unterschiede im Modal Split.** [▶ PLUSTEXT 1](#) Der Anteil des Schienengüterverkehrs an der gesamten Güterverkehrsleistung (in Tonnenkilometern) lag in der EU im Jahr 2022 laut Eurostat bei 17,1 %, der des Straßengüterverkehrs bei 77,8 %. Der Modal Split in Deutschland liegt etwa im europäischen Durchschnitt, mit einem etwas höheren Anteil des Schienengüterverkehrs. [▶ ABBILDUNG 31](#) Im Schienengüterverkehr lag der Anteil grenzüberschreitender Lieferungen und des Transitverkehrs in Deutschland im Jahr 2022 laut Eurostat bei 51 %, im EU-Durchschnitt bei 50 %. Im Straßengüterverkehr machten der grenzüberschreitende und Transitgüterverkehr in Deutschland 40,9 % der Straßengütertransporte aus (BMDV, 2023a).
74. Der **Güterverkehr** ist Voraussetzung für die geografische Arbeitsteilung in Wertschöpfungsketten, **belastet** jedoch auch **Umwelt und Gesellschaft**, z. B. durch klimaschädliche THG-Emissionen, lokale Luftverschmutzung, Lärm, Unfälle und Verkehrsstaus (Wissenschaftlicher Beirat beim BMVBS, 2009; Leisinger

▶ ABBILDUNG 30

Verkehrsleistung¹ nach Verkehrsmitteln und Gütern² im Jahr 2022

Transportmittelwahl heterogen – Straßentransport dominant



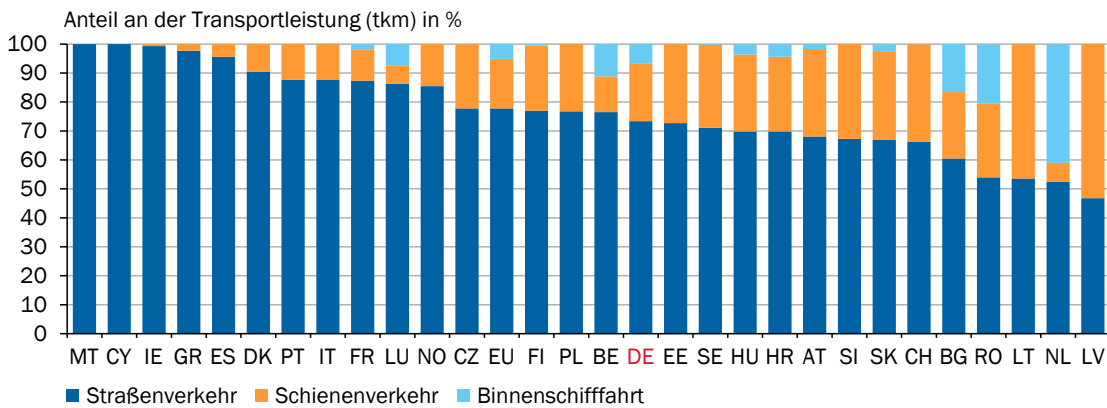
1 – Basierend auf der auf dem Bundesgebiet erbrachten Verkehrsleistung in Mrd Tonnenkilometern (ohne Seeschifffahrt).
 2 – Gemäß dem Einheitlichen Güterverzeichnis für die Verkehrsstatistik (NST 2007). 3 – Nahrungs- und Genussmittel, Textilien, Bekleidung, Leder und Lederwaren, Holzwaren, Papier, Pappe, Druckerzeugnisse. 4 – Maschinen und Ausrüstungen, Haushaltsgeräte, Fahrzeuge, Möbel, Schmuck, Musikinstrumente, Sportgeräte. 5 – Post, Pakete, Güter und Material für die Güterbeförderung, Umzugsgut und sonstige nichtmarktbestimmte Güter, Sammelgut, Gutart unbekannt, sonstige Güter. 6 – Die Verteilung auf Gütergruppen wird vom BMDV nur für inländische LKW veröffentlicht, die Verteilung für ausländische LKW wurde mithilfe von Daten des KBA (2024) geschätzt.

Quellen: BMDV, KBA (2024), eigene Berechnungen
 © Sachverständigenrat | 24-043-01

▸ **ABBILDUNG 31**

Modal Split im Inlandsgüterverkehr¹ in Europa im Jahr 2022

Straßengüterverkehr dominiert in fast allen europäischen Ländern²



1 – Abgrenzung nach dem Territorialprinzip. Enthält gesamtes Güterverkehrsaufkommen auf dem Hoheitsgebiet des jeweiligen Landes von In- und Ausländern (inkl. grenzüberschreitender Güterverkehr und Transitverkehr). 2 – MT-Malta, CY-Zypern, IE-Irland, GR-Griechenland, ES-Spanien, DK-Dänemark, PT-Portugal, IT-Italien, FR-Frankreich, LU-Luxemburg, NO-Norwegen, CZ-Tschechien, EU-Europäische Union (27), FI-Finnland, PL-Polen, BE-Belgien, DE-Deutschland, EE-Estland, SE-Schweden, HU-Ungarn, HR-Kroatien, AT-Österreich, SI-Slowenien, SK-Slowakei, CH-Schweiz, BG-Bulgarien, RO-Rumänien, LT-Litauen, NL-Niederlande, LV-Lettland. Daten für Belgien, die Schweiz und die EU geschätzt.

Quelle: Eurostat

© Sachverständigenrat | 24-093-01

und Runkel, 2023). Diese externen Kosten werden durch politische Rahmensetzung derzeit nur zum Teil internalisiert, ebenso wie die Kosten, die durch die Abnutzung der Infrastruktur entstehen (Kopper et al., 2013). ▸ **KASTEN 10**

▸ **KASTEN 10**

Hintergrund: Externalitäten und Kosteninternalisierung im Güterverkehr

Neben den Kosten, die direkt beim Transportunternehmen anfallen, verursacht der Güterverkehr Kosten durch die Abnutzung von Infrastruktur und externe Kosten, z. B. durch Umwelt- oder Lärmbelastung. Die gesamten externen Kosten des innerdeutschen Güterverkehrs wurden für das Jahr 2017 auf 32,5 Mrd Euro, etwa 1 % des Bruttoinlandsprodukts (BIP), geschätzt. Mit einem Anteil von 37 % sind die Kosten für Klimafolgen und lokale Luftverschmutzung besonders hoch (Bieler und Sutter, 2019). **Wenn externe Kosten nicht durch geeignete politische Rahmensetzung internalisiert werden**, werden sie weder von den Transportunternehmen noch von deren Kunden bei ihren Entscheidungen berücksichtigt. Dadurch **kann das Transportaufkommen im Güterverkehr ineffizient hoch ausfallen** und – soweit die externen Kosten oder deren Internalisierung unterschiedlich hoch ausfallen – die Wahl der Transportmittel verzerrt werden (Leisinger und Runkel, 2023). Nur wenige aktuelle Studien versuchen, die externen Kosten des Güterverkehrs für die EU (Europäische Kommission, 2019a, 2020) oder für Deutschland (Bieler und Sutter, 2019; UBA, 2020a) zu erfassen und zu quantifizieren. Die Studien der Europäischen Kommission (2019a, 2020) sind am umfangreichsten und berichten als einzige einen Internalisierungsgrad der Kosten für Externalitäten und Infrastruktur.

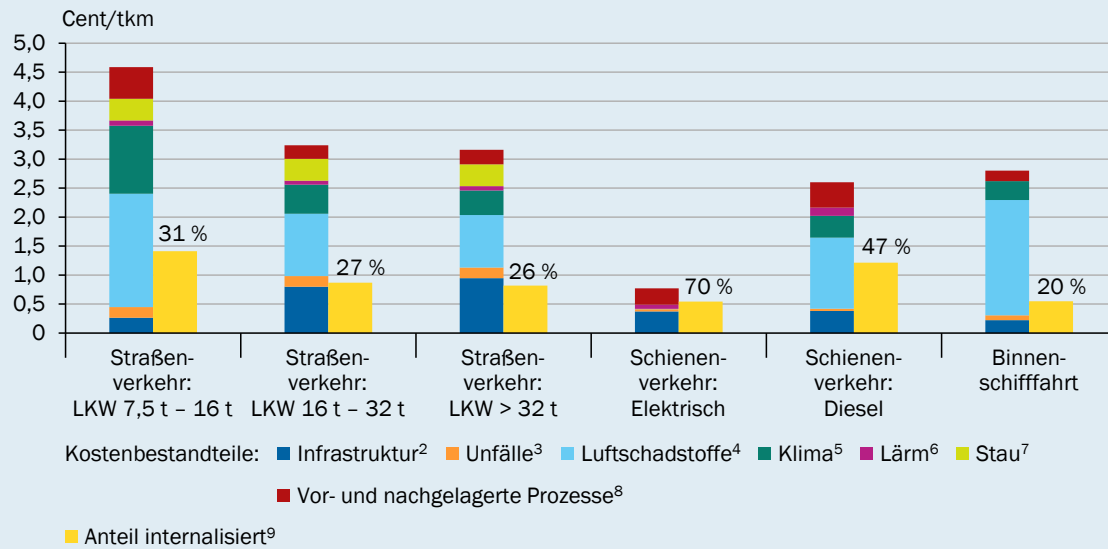
Der **Straßengütertransport** weist – gemessen an den Durchschnittskosten (Bieler und Sutter, 2019; UBA, 2020a) oder den Grenzkosten ▸ **GLOSSAR** (Europäische Kommission, 2020) – **höhere negative Externalitäten auf als andere Transportmittel**. Für den Transport eines zusätzlichen Tonnenkilometers auf der Straße fielen je nach Ladungskapazität des LKW

externe Kosten zwischen 3,2 und 4,6 Cent an. [↘ ABBILDUNG 32](#) Mehr als die Hälfte der Kosten entfallen auf Klima- und Luftverschmutzung. Beim Transport eines Tonnenkilometers durch einen elektrifizierten Zug sind die Grenzkosten mit etwa 0,8 Cent deutlich geringer. Gut ein Drittel der Grenzkosten entfällt auf die vor- und nachgelagerten Prozesse, zu denen die Energiebereitstellung für die Elektrifizierung zählt.

[↘ ABBILDUNG 32](#)

Externe marginale Kosten und deren Internalisierung im Güterverkehr im Jahr 2016¹

Der Internalisierungsgrad beim Schienenverkehr ist deutlich höher als bei anderen Verkehrsmitteln



1 – Datenbasis aus dem Jahr 2016, in Preisen von 2023 (berechnet mit dem Verbraucherpreisindex). 2 – Kosten für Neubau, Ausbau, Instandsetzung und Reparatur. 3 – Personenschäden, medizinische Kosten, Verwaltungskosten, wirtschaftliche Folgeschäden, Sachschäden und sonstige Unfallfolgekosten. 4 – Gesundheitsschäden, Ernteaufschläge, Material- und Gebäudeschäden und Verlust an Biodiversität. 5 – Kosten durch den Anstieg des Meeresspiegels, Verlust an Biodiversität, Probleme des Wassermanagements, extreme Wetterereignisse und Ernteaufschläge. Es wurde ein CO₂-Preis von 100 Euro pro Tonne zugrunde gelegt. 6 – Physische und psychische Beeinträchtigung durch Lärm. Lärmkosten können nur für den Straßenverkehr und Schienengüterverkehr zuverlässig geschätzt werden. 7 – Kosten durch Verspätungen und Überlastungen. Staukosten können nur für den Straßenverkehr zuverlässig geschätzt werden. 8 – Kosten für Erzeugung, Umwandlung, Transport und Übertragung der benötigten Energie. Für die Energieerzeugung beim Schienengüterverkehr wird der für den Schienenverkehr spezifische Strommix angenommen. Nicht berücksichtigt werden andere Kosten im Lebenszyklus wie Kosten der Produktion, der Wartung oder Entsorgung des Transportmittels. 9 – Anteil der variablen Steuern und Gebühren an den externen Grenzkosten; zu den Details siehe Ziffern 190 ff. Anhang.

Quellen: Europäische Kommission (2019a), Statistisches Bundesamt, eigene Berechnungen
 © Sachverständigenrat | 24-102-01

Der Internalisierungsgrad beim elektrifizierten Schienengüterverkehr ist deutlich höher als bei anderen Transportmitteln. [↘ ABBILDUNG 32](#) Die in der Abbildung dargestellten externen marginalen Kosten sowie deren Internalisierung wurden für das Jahr 2016 berechnet. Seither haben sich verschiedene regulatorische Änderungen ergeben. Insbesondere werden nun im Verkehr ein nationaler CO₂-Preis [↘ ZIFFER 85](#) und eine CO₂-basierte LKW-Maut [↘ ZIFFERN 87 FF.](#) erhoben. Nach Schätzungen des Sachverständigenrates dürften diese Maßnahmen den Internalisierungsgrad bei LKW bis zu 16 Tonnen um etwa elf Prozentpunkte und den von schweren LKW mit mehr als 32 Tonnen um etwa sieben Prozentpunkte erhöht haben. [↘ ZIFFERN 190 FF. ANHANG](#) Für elektrisch betriebene Güterzüge dürfte der Internalisierungsgrad insgesamt leicht zugenommen haben. Der CO₂-Preis im EU-ETS hat sich seit dem Berichtsjahr 2016 fast verzehnfacht, was zu einem deutlichen Anstieg der Internalisierung führt. Dämpfend wirkte hingegen

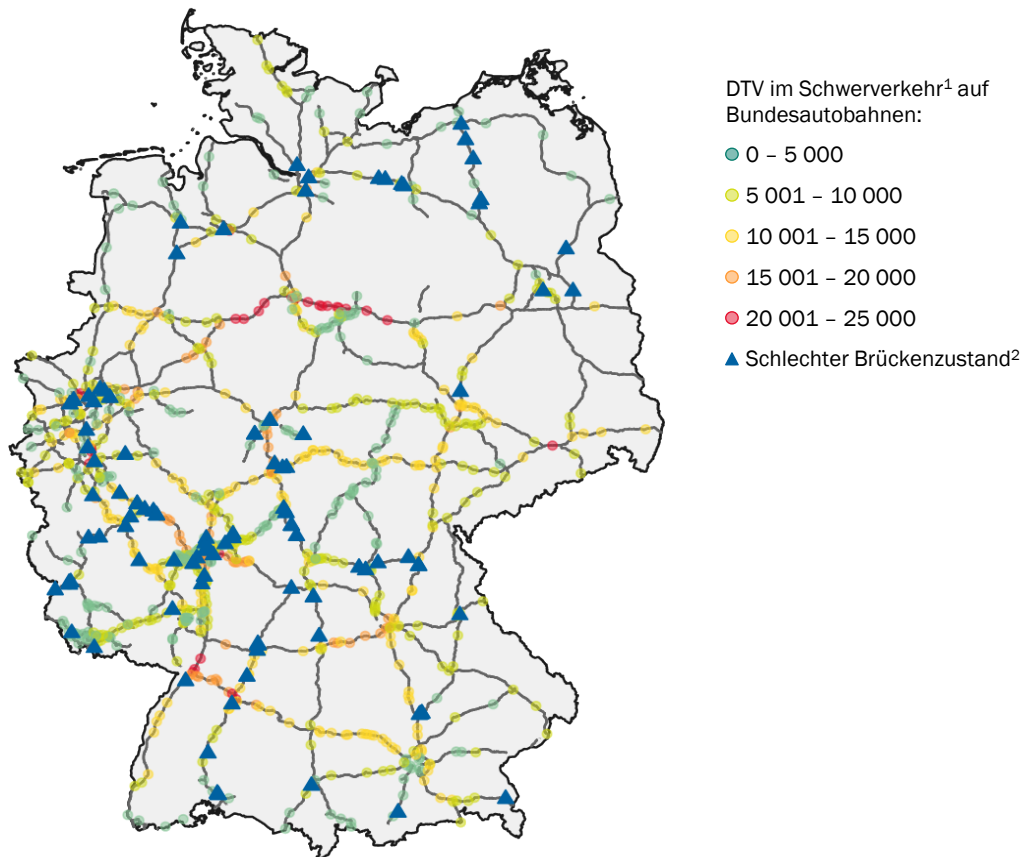
der Wegfall der EEG-Umlage auf Strom und die Subventionierung der Trassenentgelte durch den Bund. [↪ ZIFFERN 89 F.](#)

2. Herausforderung: Verkehrsinfrastruktur

75. **Deutschland spielt** wegen seiner **zentralen geografischen Lage** und der Nähe zu den drei wichtigsten Seehäfen Europas (Rotterdam, Antwerpen, Hamburg) für den europäischen Güterverkehr eine wichtige Rolle. [↪ ABBILDUNG 53 ANHANG](#) Daneben gibt es internationale Güterverbindungen auf der Schiene mit direktem Anschluss zur Binnenschifffahrt (Duisburg) sowie für den Güterverkehr bedeutende Flughäfen (Frankfurt am Main, Leipzig/Halle). Der Zustand dieser Infrastruktur hat sich jedoch bei sämtlichen Verkehrswegen in den vergangenen Jahren verschlechtert. [↪ ABBILDUNG 33](#) [↪ KASTEN 11](#) Eine Einführung verkehrsbeschränkender Maßnahmen oder gar eine Sperrung von Brücken in sehr schlechtem Zustand, wie sie beispielsweise seit dem Jahr 2021 bei der A45-Talbrücke Rahmede besteht, hat gravierende Folgen für die Wirtschaft. [↪ KASTEN 12](#)

[↪ ABBILDUNG 33](#)

Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke (DTV) auf den Bundesautobahnen im Jahr 2021
Viele marode Brücken an stark belasteten Autobahnstrecken



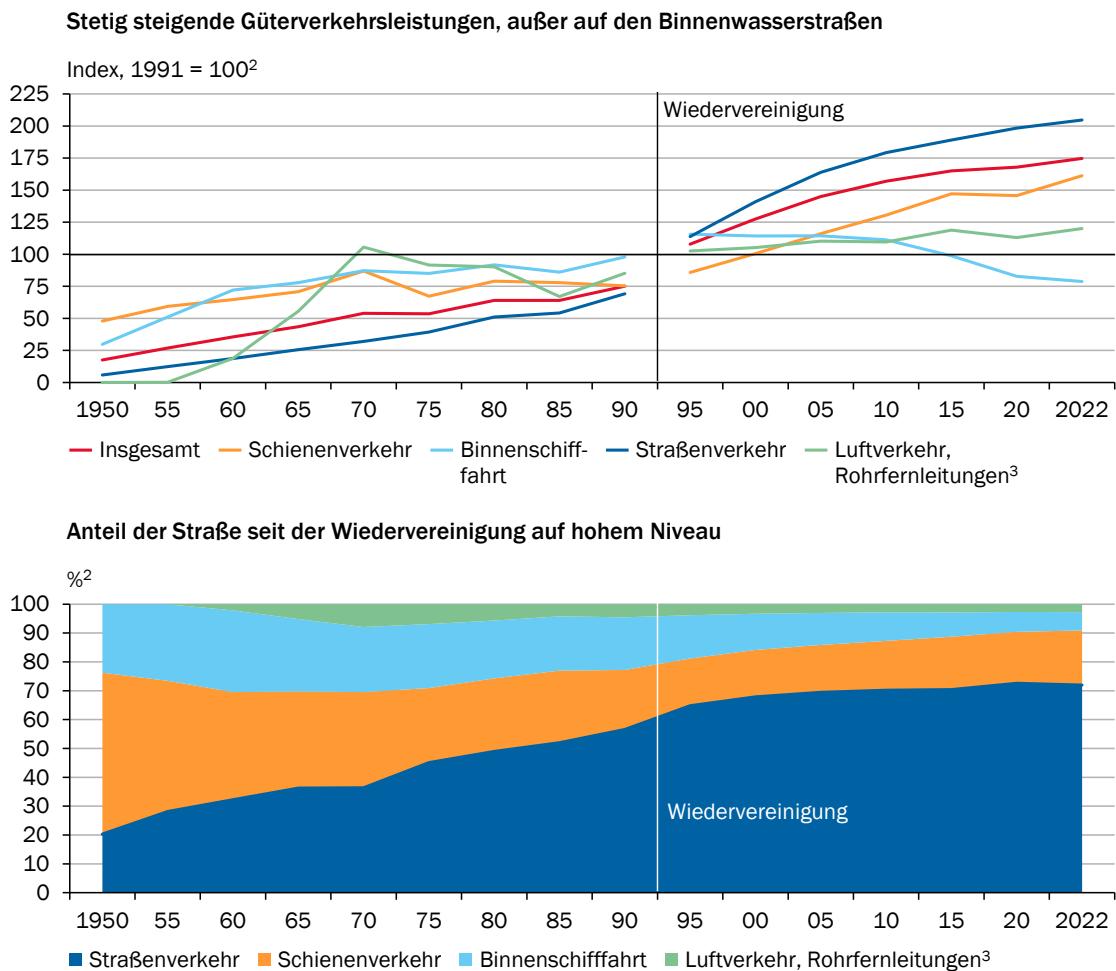
1 – Abgebildet ist die durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke im Schwerverkehr in beide Fahrrichtungen an allen Wochentagen. 2 – Brücken mit der schlechtesten Zustandsnote im Bereich von 3,5 – 4,0.

Quellen: Bundesanstalt für Straßenwesen, GADM, © OpenStreetMap contributors (2024), eigene Darstellung
© Sachverständigenrat | 24-084-01

76. Die **Güterverkehrsleistung** ist seit der Nachkriegszeit stark gestiegen, [↘ ABBILDUNG 34 OBEN](#) insbesondere im Straßengüterverkehr und, seit der Deutschen Einheit, im Schienengüterverkehr. [↘ ABBILDUNG 34 UNTEN](#) Zur Abschätzung der künftigen Entwicklung des Güterverkehrs gibt es **verschiedene Prognosemodelle** auf globaler, europäischer und nationaler Ebene, die zentraler Bestandteil der Infrastrukturplanung sind. [↘ PLUSTEXT 2](#) Die OECD rechnet in ihrem globalen Verkehrsmodell mit einem Anstieg der Güterverkehrsleistung in Europa bis zum Jahr 2050 um 71,6 % gegenüber dem Jahr 2019 (ITF, 2023a). Die EU geht in ihrem Modell von einem geringeren Anstieg um lediglich 50 % gegenüber dem Jahr 2015 aus (De Vita et al., 2021). Die gleitende Langfristprognose des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV) prognostiziert für Deutschland bis zum Jahr 2051 einen Anstieg der Güterverkehrsleistung um 46 % gegenüber dem Jahr 2019 (Intraplan und Trimode, 2023). Allen Modellen ist **gemein, dass sie eine zunehmende Güterverkehrsleistung prognostizieren**, und zwar vor allem

[↘ ABBILDUNG 34](#)

Güterverkehrsleistungen und Anteile der Verkehrsträger in Deutschland¹



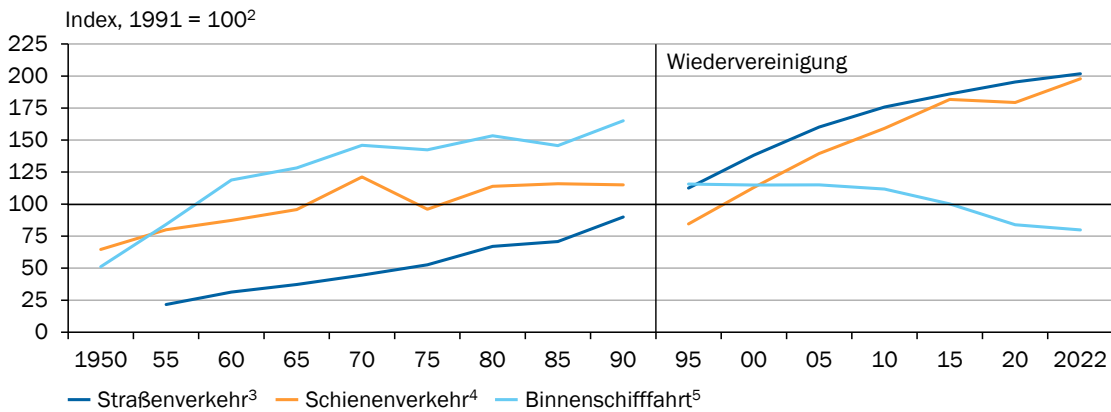
1 – Ohne Seeschifffahrt. Bis 1990: Früheres Bundesgebiet. 2 – Berechnungen auf Basis der Güterverkehrsleistung in Tonnenkilometern (tkm). Diese umfasst inländische, grenzüberschreitende und Transitfracht. Bei der Entfernung in km werden lediglich die innerhalb des Bundesgebiets zurückgelegten Strecken berücksichtigt. 3 – Luftverkehr umfasst Fracht und Luftpost ohne Umladungen.

Quellen: BMDV, eigene Berechnungen
© Sachverständigenrat | 24-013-01

▸ **ABBILDUNG 35**

Güterverkehrsleistung je km Verkehrsweg¹

Seit der Wiedervereinigung hat sich die Belastung des Straßen- und Schienennetzes stark erhöht



1 – Ohne Seeschifffahrt. Bis 1990: Früheres Bundesgebiet. 2 – Berechnungen auf Basis der Güterverkehrsleistung in Tonnenkilometern (tkm). Diese umfasst inländische, grenzüberschreitende und Transitfracht. Bei der Entfernung in km werden lediglich die innerhalb des Bundesgebiets zurückgelegten Strecken berücksichtigt. 3 – Straßen des überörtlichen Verkehrs, einschließlich Ortsdurchfahrten. Keine Daten für das Jahr 1950 verfügbar. 4 – Betriebslänge der Deutschen Bundesbahn und Reichsbahn bzw. der DB AG. Bis 1960 ohne Saarland und Berlin-West. 5 – Binnenwasserstraßen des Bundes, ohne die vom Bund zur Verwaltung an die Bundesländer delegierten Strecken (Hamburg, Ems-Jade-Kanal).

Quellen: BMDV, eigene Berechnungen

© Sachverständigenrat | 24-068-01

im Straßengüterverkehr. So wird für Deutschland mit einem stärkeren Zuwachs bei der Güterverkehrsleistung über die Straße (+54 %) als über die Schiene (+33 %) oder die Wasserstraße (0 %) gerechnet (Intraplan und Trimode, 2023). Der Anteil der Schiene am Modal Split könnte sich nach dieser Prognose künftig auf rund 17,3 % reduzieren.

- 77. Große Teile der Infrastruktur in Deutschland sind nicht für die Belastung durch den heutigen Güterverkehr ausgelegt.** Beim Straßen- und Schienenverkehr hat sich die Güterverkehrsleistung je km seit der Wiedervereinigung verdoppelt. ▸ **ABBILDUNG 35** Die Altersstruktur der Brückenbauwerke ist angesichts der steigenden Belastungen ein zunehmendes Problem (JG 2019 Abbildung 88). ▸ **KASTEN 11** Schon heute ist die Verkehrsinfrastruktur bei sämtlichen Verkehrswegen in einem schlechten Zustand. ▸ **KASTEN 11** Zeitnah werden viele Ersatz- und Sanierungsmaßnahmen durchgeführt werden müssen. Dies betrifft sämtliche Verkehrswege und erschwert eine mögliche Verlagerung der Transporte von der Straße auf Schienen- oder Wasserwege.

▸ **KASTEN 11**

Hintergrund: Zustand der Verkehrsinfrastruktur in Deutschland

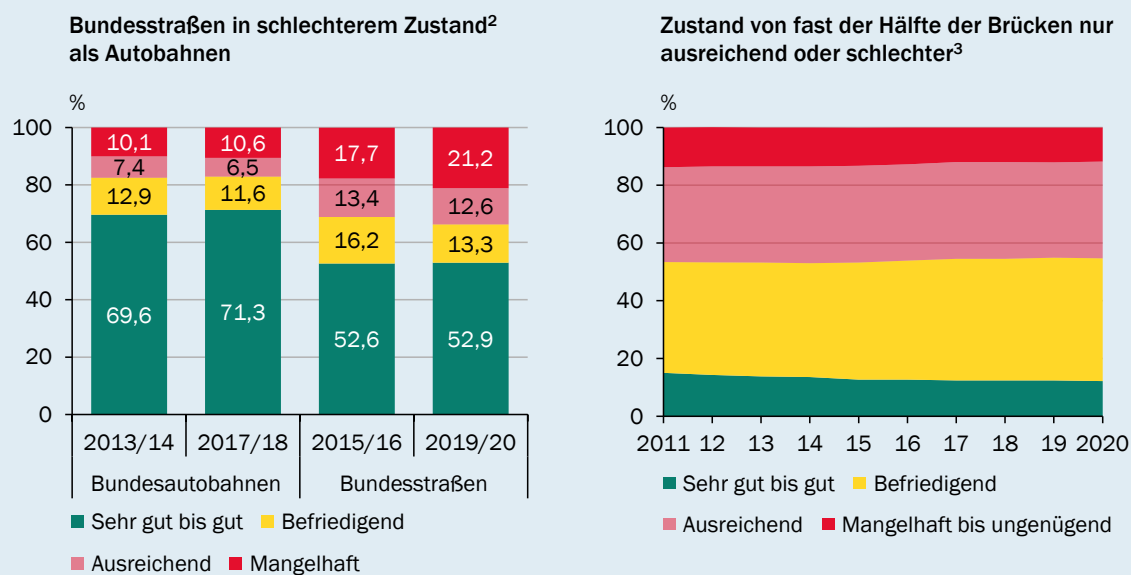
Der **Zustand der Straßen- und Schieneninfrastruktur** wird in **regelmäßigen Abständen einer Bewertung unterzogen**, die als Datengrundlage für das Erhaltungsmanagement und die Planung von Erhaltungsmaßnahmen dient. Die Zustandsnoten bewegen sich zwischen 1 (sehr gut/neuwertig) und 5 (sehr schlecht/mangelhaft). Sie geben an, ob Instandhaltungsmaßnahmen notwendig sind, lassen aber keinen Rückschluss auf mangelnde Verkehrssicherheit der Bauwerke zu. Bauwerke mit schlechten Zustandsnoten sind unter Einschränkungen weiterhin

nutzbar (BMDV, 2023b, S. 178 ff.; DB InfraGO, 2024a, S. 9 ff.).

Bei den Bundesfernstraßen lässt sich der Zustand am Substanz- und Gebrauchswert ablesen. Die **Substanzwerte** zeigen, dass die **Bundesautobahnen im Gegensatz zu den Bundesstraßen und den kommunalen Straßen in einem vergleichsweise guten Zustand sind**. [↘ ABBILDUNG 36 LINKS](#) Bei 10,6 % der Bundesautobahnen und 21,2 % der Bundesstraßen sind verkehrsbeschränkende Maßnahmen (z. B. Reduzierung der Geschwindigkeit, Abstandsregelungen) zu prüfen oder bereits eingeleitet. Die **Gebrauchswerte** hingegen, die den Fahrkomfort und nicht den baulichen Zustand der Straße abbilden, **fallen deutlich besser aus**. Dies lässt vermuten, dass sich die **Instandhaltungsarbeiten vor allem auf die Wiederherstellung einer guten Oberfläche konzentrieren**, ohne die bauliche Substanz zu verbessern (Wissenschaftlicher Beirat beim BMWi, 2020).

[↘ ABBILDUNG 36](#)

Zustand¹ der Straßen und Brücken auf Bundesfernstraßen



1 – Die Angaben entstammen den Verkehrsinvestitionsberichten des BMDV der jeweiligen Jahre. 2 – Zusammengefasste fünfstufige Substanzwerte. Die Kategorien sehr gut bis gut entsprechen den Noten 1 bis 2,5, befriedigend 2,5 bis 3,5, ausreichend 3,5 bis 4,5 und mangelhaft 4,5 bis 5. Ab der Note 3,5 ist der Warnwert überschritten und es wird eine intensive Beobachtung und Analyse sowie ggf. die Planung von Maßnahmen eingeleitet. 3 – Zusammengefasste sechsstufige Zustandsnoten. Die Kategorien sehr gut bis gut entsprechen den Noten 1 bis 1,9, befriedigend 2,0 bis 2,4, ausreichend 2,5 bis 2,9 und mangelhaft bis ungenügend 3,0 bis 4,0. Ab der Note 3,0 ist der Warnwert überschritten und es sind in naher Zukunft Instandsetzungsmaßnahmen zu ergreifen.

Quellen: BMDV, Deutscher Bundestag
© Sachverständigenrat | 24-064-01

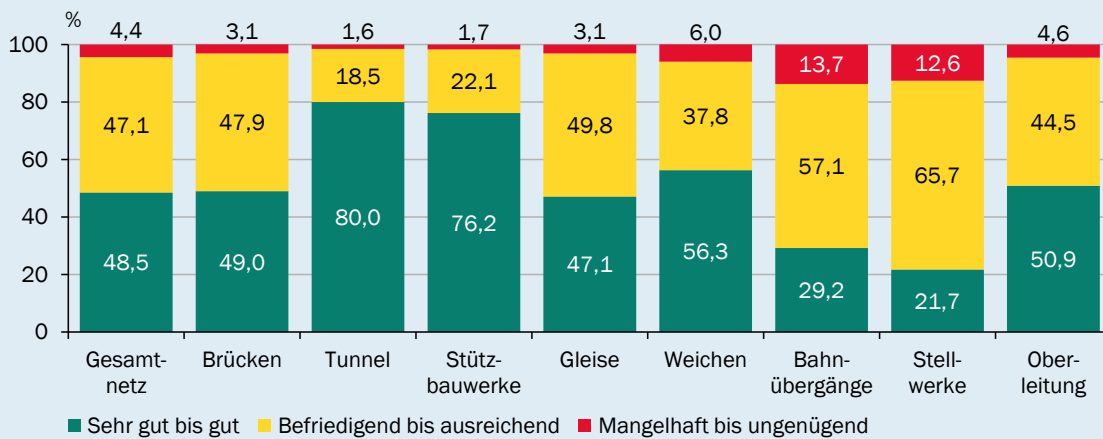
Auch der Zustand von Brücken an Bundesfernstraßen verschlechtert sich. [↘ ABBILDUNG 36 RECHTS](#) Ein wichtiger Teil der heutigen Brücken im früheren Bundesgebiet wurde während der 1970er-Jahre gebaut (JG 2019 Abbildung 88). Die dabei zugrunde gelegten Verkehrslastmodelle richteten sich nach den damals zulässigen Fahrzeuggesamtgewichten und Achslasten. Diese haben sich jedoch in den folgenden Jahrzehnten erhöht, weshalb gerade die älteren Brücken mit Baujahr vor dem Jahr 1985 lediglich für deutlich geringere Belastungen ausgelegt sind (BMDV, 2022). [↘ ABBILDUNG 36 RECHTS](#) So wurde beispielsweise bei der Talbrücke Rahmede an der A45 in den 1960er-Jahren mit einer täglichen Verkehrsbelastung im Jahr 1980 von 25 000 Fahrzeugen geplant. Bei Fertigstellung der Brücke im Jahr 1968 lag das zulässige Gesamtgewicht bei 38 Tonnen. Zuletzt lag die Belastung der Brücke jedoch bei 64 000 Fahrzeugen, wovon rund 13 000 LKW waren (Autobahn GmbH, 2024). Zusätzlich liegt das heutige zulässige

Gesamtgewicht für LKW mit 40 Tonnen höher als damals und Daten von LKW-Wiegeanlagen an anderen Brücken bestätigen, dass selbst dieses Gewicht regelmäßig überschritten wird (Land.NRW, 2019). Gemessen an der heutigen Nutzungsdauer von 100 Jahren haben demnach viele Brücken bereits die Hälfte ihres Lebenszyklus erreicht. Die stark gestiegene Güterverkehrsleistung belastet diese jedoch stärker als ursprünglich geplant, [ABBILDUNG 34 OBEN](#) weshalb die tatsächliche Lebensdauer niedriger liegen dürfte (BMDV, 2022).

Der Zustand der Schieneninfrastruktur wurde erstmals im Jahr 2021 im Netzzustandsbericht mit einem zur Straße ähnlichen Notenschema bewertet. Die **Gesamtnote des Schienennetzes** von 3,01 im Jahr 2022 hat sich im Vergleich zum Vorjahr (2,93) **weiter verschlechtert**. [ABBILDUNG 37](#) Über die Hälfte der Anlagen gilt als mittelmäßig oder schlechter, muss daher potenziell instandgesetzt oder erneuert werden, oder weist sogar Nachholbedarf auf. Von 16,2 % der Anlagen im Gesamtnetz geht eine erhöhte Wahrscheinlichkeit zur Beeinträchtigung des Betriebs aus. **Pünktlichkeitsrelevante Anlagen wie Stellwerke, Bahnübergänge, Gleise und Weichen erhalten die schlechteste Bewertung.**

[ABBILDUNG 37](#)

Zustandsnoten¹ nach Anlagentypen für das Gesamtnetz der Bahn im Jahr 2022 Stellwerke, Bahnübergänge, Gleise und Weichen in schlechtem Zustand



1 – Zusammengefasste Zustandsnoten in Anlehnung an das Notenschema des Netzzustandsberichts. Die Kategorien sehr gut bis gut entsprechen den Noten 1 bis 2, befriedigend bis ausreichend 3 bis 4 und mangelhaft bis ungenügend 5 bis 6 (einschränkend).

Quellen: DB InfraGO (2024a), eigene Berechnungen
© Sachverständigenrat | 24-065-01

Auch bei der Schiene weist über die Hälfte der Brücken einen schlechten Zustand auf und benötigt mindestens Instandhaltungsmaßnahmen und eine parallele Planung von Ersatzinvestitionen. [ABBILDUNG 37](#) Bei 5,8 % bzw. 1 485 Eisenbahnbrücken ist ein Neubau erforderlich (DB InfraGO, 2024a). Hauptverantwortlich für den schlechten Zustand vieler Anlagentypen ist deren Überalterung und die damit einhergehende Störanfälligkeit (DB InfraGO, 2024a). Die Anzahl der Infrastrukturmängel ist daher zuletzt angestiegen und die gesetzten Ziele der Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung (LuFV) wurden deutlich verfehlt (DB, 2024a).

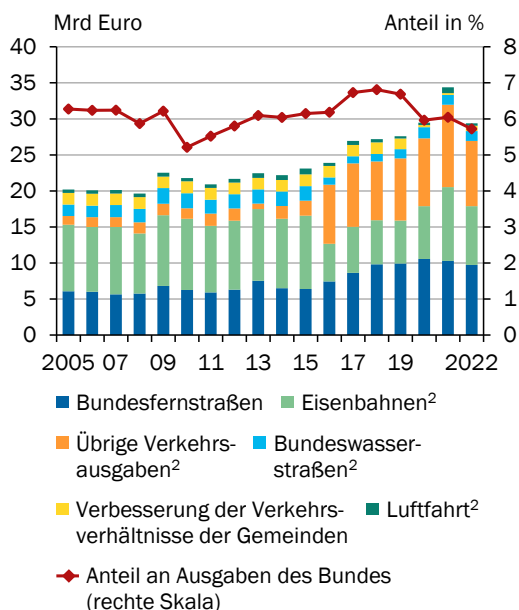
Der Erhaltungszustand von Brücken über dem Kanalnetz von Wasserstraßen ist ebenfalls schlecht. Fast 50 % aller Brücken und 85 % der Schleusen weisen nur einen ausreichenden oder schlechteren Erhaltungszustand auf (BMVI, 2015a, 2020). [ZIFFER 95](#)

78. Die Ausgaben des Bundes für die Verkehrswege verharrten in den Jahren von 2005 bis 2015 preisbereinigt auf weitgehend konstantem Niveau. [ABBILDUNG 38 LINKS](#) Gemessen am Bundeshaushalt ist der Anteil der Verkehrsausgaben nach der Finanzkrise sogar deutlich zurückgegangen. Erst seit dem Jahr 2016 steigen sie

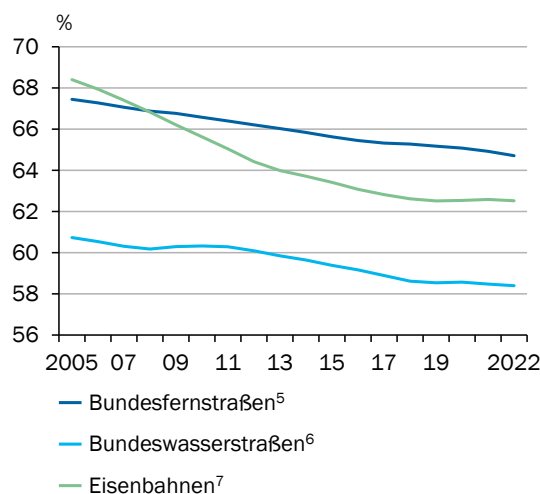
▸ **ABBILDUNG 38**

Entwicklung der Verkehrsausgaben des Bundes und des Modernitätsgrads

Schiene und Straße treiben erhöhte Verkehrsausgaben¹ seit 2016



Modernitätsgrad³ sinkt: Investitionen unzureichend für Werterhalt⁴



1 – Verkehrsausgaben preisbereinigt mit der durchschnittlichen Entwicklung der Baupreisindizes im Hoch- und Tiefbau. 2 – Im Rahmen einer umfassenden Modernisierung des Haushalts- und Rechnungswesens im Jahr 2016 wurden Verwaltungsleistungen und Sondervermögen in die übrigen Verkehrsausgaben umgegliedert. 3 – Netto-Anlagevermögen in Relation zum Brutto-Anlagevermögen. Jahresendbestand ohne Grunderwerb. 4 – Für die Jahre 2020 bis 2022 vorläufige Werte. 5 – Ohne Verwaltung. 6 – Bis zur Seegrenze. 7 – Verkehrswege; bis 2012 Konzern der Deutschen Bahn. Ab 2005 veränderte Datenbasis. Ab 2013 Systemverbund Bahn.

Quellen: BMDV, Statistisches Bundesamt, eigene Berechnungen
© Sachverständigenrat | 24-066-02

wieder merklich an. Hiervon hat vor allem die Schiene profitiert. Auch die Mittel für Wasserstraßen und Bundesfernstraßen wurden erhöht. **Am aktuellen Rand dämpfen jedoch die stark gestiegenen Preise das Wachstum** der realen Ausgaben. Im Jahr 2022 betrug der Anteil der Verkehrsausgaben am Bundeshaushalt 5,7 %. Davon entfielen 60,1 % auf Investitionen und 39,9 % auf Instandhaltung. Als Investitionen gelten dabei Erhaltungsmaßnahmen, die über die normale Instandhaltung hinausgehen, sowie Ersatz- oder Neubauten. Zum Werterhalt der Infrastruktur ist die Höhe der Investitionen jedoch unzureichend. [▸ ABBILDUNG 38 RECHTS](#) Lediglich bei der Schiene konnte der Wertverfall, also der Rückgang des Modernitätsgrads, zuletzt gestoppt werden.



▸ **PLUSTEXT 2**

Hintergrund: Bundesverkehrswegeplan (BVWP) als zentrales Instrument der Verkehrsinfrastrukturplanung

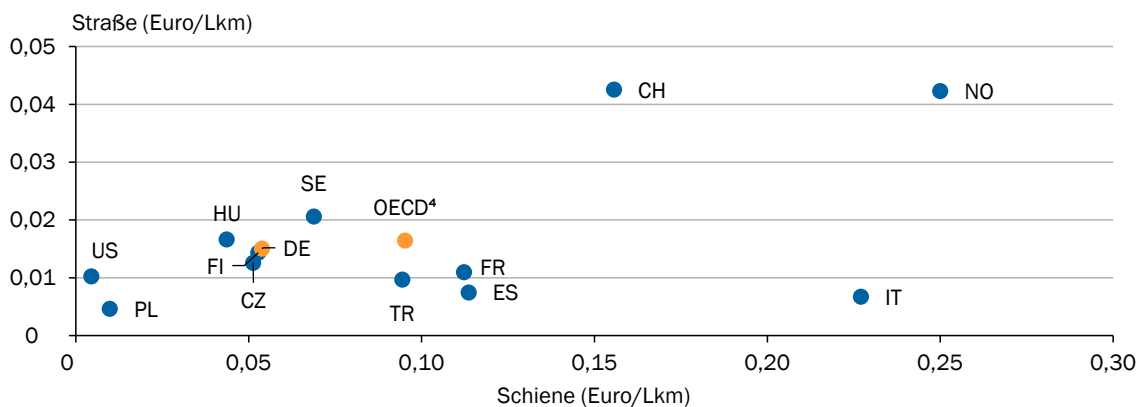
Der **BVWP** ist eine **Sammlung von Projekten zum Erhalt und Ersatz sowie zum Aus- und Neubau von Verkehrsinfrastruktur**. Er umfasst einen Zeitraum von 15 Jahren, stellt aber keine Planungs- oder Finanzierungszusage dar (Deutscher Bundestag, 2023a). **Aktuell** gilt der im Jahr 2016 beschlossene BVWP **bis zum Jahr 2030**. Er umfasst 141,6 Mrd Euro für Erhalt und Ersatz und 63,6 Mrd Euro für Aus- und

Neubau. Der Bedarf für Erhalt und Ersatz wird aus dem aktuellen Zustand der Bauwerke und dem aufgrund der bisherigen Verkehrsentwicklung zu erwartenden Verschleiß berechnet und mit dem BVWP 2030 erstmalig vollumfänglich übernommen (Maerschalk et al., 2017). Aus- und Neubauprojekte können von den beauftragten Verwaltern der Verkehrsinfrastruktur und von privaten Akteuren eingereicht werden. Unter Berücksichtigung des erwarteten Verkehrsaufkommens (Verkehrsprognose 2030) werden diese im Anschluss auf ihre Wirtschaftlichkeit, die Umweltauswirkungen sowie auf raumordnerische und städtebauliche Aspekte hin geprüft. Nur Projekte mit einem günstigen Nutzen-Kosten-Verhältnis werden in den BVWP aufgenommen. Die priorisierten Projekte bekommen über die vom Bundestag verabschiedeten Ausbaugesetze und Bedarfspläne eine gesetzliche Grundlage und werden aus dem Bundeshaushalt finanziert. Zu ihrer Realisierung stellt das BMDV fünfjährige Investitionspläne auf. Alle fünf Jahre wird überprüft, ob die Bedarfspläne an die aktuelle Verkehrsentwicklung angepasst werden müssen (BMVI, 2016).

79. **Im internationalen Vergleich lag Deutschland bei den Investitionen in den Schienen- und Straßenverkehr im Jahr 2020 unter den OECD-Ländern jeweils im Mittelfeld.** [ABBILDUNG 39](#) Normiert auf die Verkehrsleistung werden je Leistungskilometer (Personen- und Tonnenkilometer) für die Straße etwa 1,5 Cent und für die Schiene etwas mehr als 5 Cent durch die öffentlichen Haushalte ausgegeben. Länder wie Norwegen, die Schweiz und Schweden investieren deutlich mehr als Deutschland, sowohl in ihre Schienen- als auch in die Straßeninfrastruktur.

[ABBILDUNG 39](#)

Infrastrukturinvestitionen¹ je Leistungskilometer² im Jahr 2020 im internationalen Vergleich³
 Deutschland investiert unterdurchschnittlich in Straße und Schiene



1 – Infrastrukturinvestitionen umfassen Ausgaben für Neubau und Verbesserungen der bestehenden Verkehrswege.

2 – Leistungskilometer (Lkm) umfassen die Güterverkehrsleistung in Tonnenkilometer und die Personenverkehrsleistung in Personenkilometer. 3 – CH-Schweiz, CZ-Tschechien, DE-Deutschland, ES-Spanien, FI-Finnland, FR-Frankreich, HU-Ungarn, IT-Italien, NO-Norwegen, PL-Polen, SE-Schweden, TR-Türkei, US-USA. 4 – Ungewichteter Mittelwert der gezeigten Länder.

Quellen: OECD, eigene Berechnungen

© Sachverständigenrat | 24-059-01

▸ KASTEN 12

Fokus: Gesamtwirtschaftliche Auswirkungen des Infrastrukturzustands

In Deutschland geben vier von fünf Unternehmen aus dem Produzierenden Gewerbe und dem Dienstleistungssektor an, dass sie durch Infrastrukturmängel in ihren Geschäftsabläufen regelmäßig beeinträchtigt werden (Puls und Schmitz, 2022). Besonders wichtig ist in Deutschland die Verkehrsinfrastruktur für das Verarbeitende Gewerbe. Dies liegt sowohl an notwendigen Transporten von Vorprodukten zu den Produktionsstätten als auch an der Lieferung der fertigen Waren an den Großhandel, Export(flug)häfen sowie Konsumentinnen und Konsumenten. Damit ist der **Güterverkehr nicht nur am Anfang von Wertschöpfungsketten relevant**, wo diese am fragilsten sind (Costinot et al., 2013; Demir et al., 2024). **Vielmehr wird er im Produktionsprozess mehrfach in Anspruch genommen**, da die Wertschöpfung typischerweise in mehreren Schritten und in unterschiedlichen Betrieben an verschiedenen Standorten erfolgt. Die Produktionsstruktur wurde in den vergangenen zwei Jahrzehnten immer stärker in (globale) Wertschöpfungsketten fragmentiert und auf Just-in-time-Lieferprozesse umgestellt (Baldwin, 2022). Dies hat dazu geführt, dass schon eine kleine Verlängerung oder Verzögerung der Gütertransporte erhebliche Auswirkungen auf das Verarbeitende Gewerbe haben kann. Beispiele dafür waren die Störungen der Lieferketten aufgrund der Überlastung der Hafenaufbereitung nach den großen Lockdowns während der Corona-Pandemie in den Jahren 2020 und 2021, die Blockade des Suez-Kanals zu Jahresbeginn 2021, aber auch der niedrige Wasserstand im Rhein und in anderen wichtigen Binnenflüssen Deutschlands, z. B. im Sommer 2018 (Ademmer et al., 2019, 2023; Stamer, 2021; Meier und Pinto, 2024). Aufgrund des hohen Wertschöpfungsanteils des Verarbeitenden Gewerbes in Deutschland von etwa 20 % in den letzten zehn Jahren können solche Störungen auch gesamtwirtschaftlich bedeutsam sein (OECD, 2024).

Die grundsätzliche **Bedeutung der Transportinfrastruktur für die Wertschöpfung** lässt sich anhand struktureller Modelle der regionalen Wertschöpfungsstruktur erkennen: So war die Gesamtwohlfahrt durch den Ausbaustand des westdeutschen Autobahnnetzes im Jahr 1974 um 16,1 % höher, als sie es ohne Autobahnnetz gewesen wäre (Santamaría, 2022). Das reale Einkommen lag um 4,6 % über dem der Referenzsituation.

Im einfachen Vergleich von Regionen untereinander bestätigt sich dies: Für Deutschland schätzen Gaus und Link (2020) mit einer Panelregression den Zusammenhang zwischen der regionalen Verkehrsinfrastruktur und regionaler Bruttowertschöpfung auf Ebene der Landkreise. Die **bessere Ausstattung eines Landkreises sowohl mit Autobahnen als auch mit Bundesstraßen steigert die regionale Bruttowertschöpfung**. Aber auch die Dichte der Straßennetze in den Nachbarregionen beeinflusst das regionale Wachstum stark positiv. Eine schlechte Qualität der Bundesstraßen kann dagegen wachstumshemmend wirken.

Die **makroökonomische Elastizität der gesamtwirtschaftlichen Produktion in Bezug auf Infrastrukturinvestitionen** wurde in frühen Studien auf zwischen 0,05 und 0,39 geschätzt (Stephan, 2001, 2003; Kemmerling und Stephan, 2002; Wieland und Ragnitz, 2015). Bei einem Anstieg des Infrastrukturkapitalstocks um 1 % könnte die gesamtwirtschaftliche Produktion also um 0,05 % bis 0,4 % steigen. Dementsprechend benötigt es hohe Investitionen in Verkehrsinfrastruktur, um einen merklichen Anstieg des BIP auszulösen (Wieland und Ragnitz, 2015). Allerdings können die Grenzerträge dieser Art Investitionen unter der Annahme von Abschreiberaten von 10 % und langfristigen realen Zinssätzen von 4 % bei 16 % liegen (Bom und Ligthart, 2014). Dies deckt sich mit der generellen Literatur zu den Auswirkungen von öffentlichen Investitionen auf die gesamtwirtschaftliche Produktion (Bom und Ligthart, 2014; Belitz et al., 2020; Ramey, 2021). Laut einer Metastudie liegt die Elastizität der privaten Produktion, d. h. der Produktion des Verarbeitenden Gewerbes sowie von Dienstleistungen, in Bezug auf Investitionen in die Kerninfrastruktur, also Straßen, Schienen, Flughäfen sowie Energie- und Wasserversorgung, bei 0,083 in der kurzen Frist und bis zu 1,22 in der langen Frist (Bom und Ligthart, 2014).

Durch Einschränkungen der Infrastruktur wie z. B. Staus oder Brückensperrungen aufgrund ihres schlechten Zustands [↘ KASTEN 11](#) kann die Produktion behindert werden. So zeigt Gaus (2023), dass Brückensperrungen die Kosten der Produktion lokal erhöhen, da Umwege im Transport entstehen. Eine mangelhafte Befahrbarkeit von Wasserwegen führt ebenso zu erhöhten Produktionskosten: Im Jahr 2022 fielen die Pegelstände am Mittelrhein kurzfristig auf historische Tiefstände, weswegen zeitweise die dreifache Anzahl an Transporten nötig war, um die gleiche Menge zu transportieren (Ademmer et al., 2019, 2023; FAZ, 2022).

3. Herausforderung: Dekarbonisierung

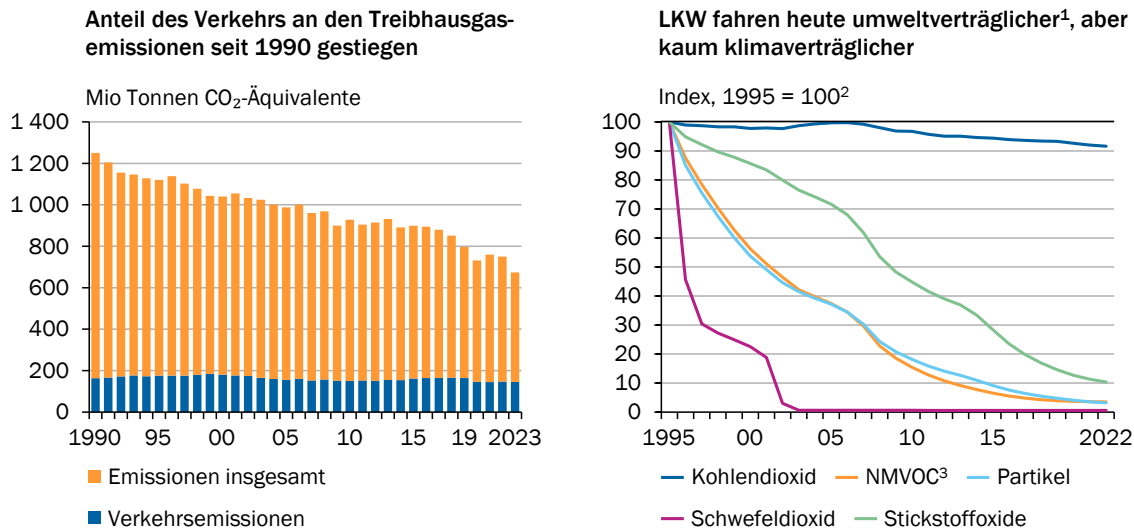
80. **Deutschland und die EU streben bis Mitte des Jahrhunderts Klimaneutralität an.** Als Zwischenziel legt das Bundes-Klimaschutzgesetz fest, dass die gesamten THG-Emissionen gegenüber dem Jahr 1990 bis zum Jahr 2030 um 65 % sinken müssen. Nach dem Europäischen Klimagesetz müssen die Mitgliedstaaten die Netto-THG-Emissionen bis 2030 um mindestens 55 % gegenüber dem Jahr 1990 senken, bis zum Jahr 2050 um 90 %.

Mit der jüngsten Novelle des Bundes-Klimaschutzgesetzes verlieren jahresscharfe **Emissionsgrenzen des Verkehrssektors an Relevanz.** Die **CO₂-Einsparvorgaben der Lastenteilungsverordnung der EU** (European Effort Sharing Regulation, ESR) **gelten** allerdings **weiter.** Demnach muss Deutschland in den Bereichen Verkehr, Gebäude, Landwirtschaft und Abfall seine **Emissionen bis zum Jahr 2030 um 50 % im Vergleich zum Jahr 2005 senken.** Laut Projektionsbericht des Umweltbundesamtes (Harthan et al., 2023) droht Deutschland ab dem Jahr 2026 mehr zu emittieren, als in den Sektoren unter der Lastenteilungsverordnung erlaubt ist. In diesem Fall müsste Deutschland als Ausgleich spätestens im Jahr 2033 Zertifikate anderer Mitgliedstaaten zukaufen (Expertenrat für Klimafragen, 2024). Die Kosten für etwaige Ankäufe von Emissionszertifikaten anderer EU-Mitgliedstaaten abzuschätzen ist schwierig, da die Zertifikatspreise auch davon abhängen, wie hoch die Defizite in der Zielerreichung in anderen Mitgliedstaaten ausfallen. Einzelne Schätzungen gehen jedoch davon aus, dass dadurch Kosten in Milliardenhöhe für Deutschland entstehen könnten (Kurmayer, 2023).

81. In Deutschland entstehen rund 20 % der THG-Emissionen im Verkehrssektor (UBA, 2024a). Von 1990 bis 2023 sind die THG-Emissionen in Deutschland insgesamt um 46 % gesunken (UBA, 2024b). Die Emissionen im Verkehrssektor sind dagegen nahezu konstant geblieben. **Der Anteil des Verkehrs an den Gesamtemissionen ist** somit seit 1990 von etwa 13 % auf 21,6 % im Jahr 2023 **gestiegen.** [↘ ABBILDUNG 40 LINKS](#) Die Corona-Pandemie führte lediglich zu einem kurzzeitigen Rückgang der THG-Emissionen im Verkehrssektor. Ein Drittel der THG-Emissionen des Verkehrssektors und der daraus resultierenden negativen Klimawirkung [↘ KASTEN 10](#) wird durch den Güterverkehr verursacht. Der Anteil von Nutzfahrzeugen an den gesamten Verkehrsemissionen ist in den vergangenen Jahren angestiegen. [↘ ABBILDUNG 41](#)

▸ **ABBILDUNG 40**

Emissionen des Verkehrs



1 – Im Sinne lokal wirksamer Schadstoffe. 2 – Spezifische Emissionen von LKW (direkte Emissionen je Fahrleistung in g/km) normiert auf das Jahr 1995. 3 – Flüchtige organische Verbindungen ohne Methan (non-methan volatile organic compound).

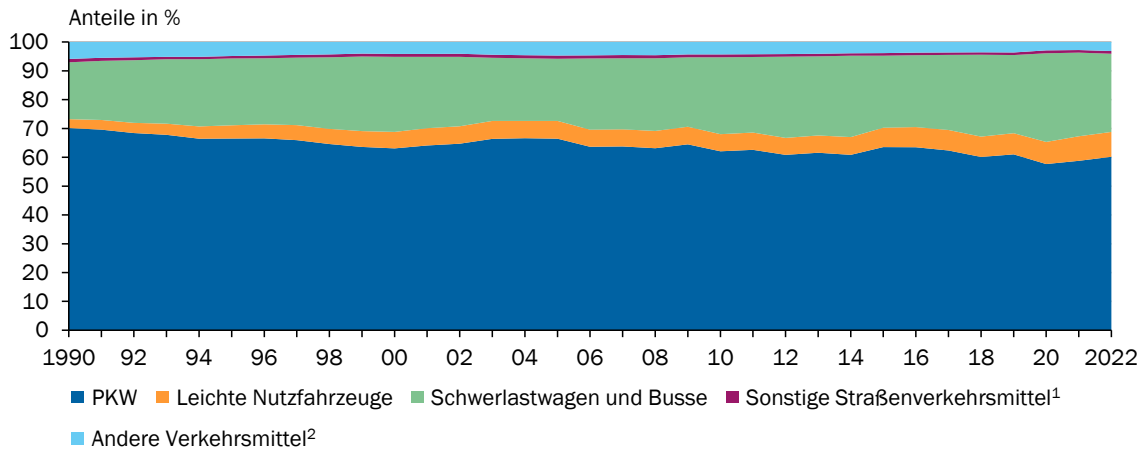
Quelle: Umweltbundesamt

© Sachverständigenrat | 24-018-01

82. Durch bessere Motoren, bessere Abgastechnik und eine höhere Kraftstoffqualität sind die Emissionen von LKW pro Kilometer seit 1995 gesunken. ▸ **ABBILDUNG 40 RECHTS** Dabei verringerten sich vor allem die Emissionen lokal wirksamer Luftschadstoffe. Die Luftbelastung durch Schwefeldioxid-Emissionen sank beispielsweise um mehr als 98 % im Vergleich zum Ausgangsjahr. Die THG-Emissionen je km sanken lediglich um 10 %. Die gesamten **THG-Emissionen des Straßengüterverkehrs sind durch den starken Anstieg der Güterverkehrsleistung** zwischen den Jahren 1995 und 2021 sogar um 23 % **gestiegen** (UBA, 2023a). Der Straßengüterverkehr ist damit für etwa 98 % der im inländischen Güterverkehr ausgestoßenen THG-Emissionen verantwortlich (DLR, 2022).
83. Leichte Nutzfahrzeuge mit bis zu 3,5 Tonnen zulässigem Gesamtgewicht machen rund 75 % des Bestands an Nutzfahrzeugen aus, sie sind aber nur für rund 20 % der THG-Emissionen im Nutzfahrzeugsbereich verantwortlich (Timmerberg et al., 2017). Den **Großteil der THG-Emissionen im Straßengüterverkehr stoßen** schwere Nutzfahrzeuge ab 3,5 Tonnen, vor allem **Last- und Sattelzüge, aus**, die vorwiegend im Fernverkehr bei hohen Transportdistanzen eingesetzt werden (Göckeler et al., 2023). Bei typischen Verbrauchswerten und Jahresfahrleistungen entspricht die Dekarbonisierung eines solchen LKW der von 52 PKW (Marker, 2024). Hier besteht somit ein besonders starker Hebel für die Dekarbonisierung des Verkehrssektors.
84. Der elektrifizierte **Schienengüterverkehr stößt deutlich weniger THG-Emissionen aus als der Straßengüterverkehr**. ▸ **TABELLE 13 ANHANG** Der Transport auf der Wasserstraße hat aus Perspektive des Klimaschutzes ebenfalls Vorteile gegenüber dem LKW-Transport. In der Luftschadstoffbilanz ist der

▸ ABBILDUNG 41

Entwicklung der anteiligen THG-Emissionen im Verkehr nach Verkehrsmittel
Nutzfahrzeuge mit steigendem Anteil an den Verkehrsemissionen



1 – Motorräder und andere Straßenverkehrsmittel. 2 – Schienen-, Schiffs-, Flug- und übriger Verkehr.

Quellen: Eurostat, eigene Berechnungen

© Sachverständigenrat | 24-079-01

Transport per Binnenschiff jedoch deutlich schlechter als andere Verkehrsmittel (UBA, 2020b).

4. Regulatorischer Rahmen für die Dekarbonisierung des Güterverkehrs

85. Der **CO₂-Preis** stellt das **Leitinstrument zum Erreichen der Klimaziele** in der EU dar (UBA, 2023b; SG 2019 Ziffern 107 ff.). Derzeit werden die CO₂-Emissionen der Industrie, des Energiesektors und des Luftverkehrs über den europäischen Emissionshandel EU-ETS (EU Emissions Trading System) bepreist. Für das Jahr 2027 plant die EU die Einführung eines zweiten europäischen Emissionshandelssystems (EU-ETS II), das die bislang noch nicht vom ETS abgedeckten Sektoren Verkehr und Gebäude umfassen soll. Bislang werden diese Sektoren in Deutschland durch den nationalen Emissionshandel (nEHS) abgedeckt. Deutschland beabsichtigt, den nEHS dann in das neue europäische Handelssystem zu überführen (Deutscher Bundestag, 2023b). **Die CO₂-Emissionen des Güterverkehrs unterliegen somit unterschiedlichen Emissionshandelssystemen und daher unterschiedlichen CO₂-Preisen.** Der Teil des Güterverkehrs, der elektrisch betrieben wird, unterliegt dem EU-ETS. Dies gilt sowohl für den Schienengüterverkehr als auch für den Straßengüterverkehr. Im Schienengüterverkehr wurden im Jahr 2020 97 % der Güterverkehrsleistung elektrisch erbracht (Allianz pro Schiene, 2024). [▸ ZIFFER 84](#)
86. Für die kommenden Jahre ist es **unsicher, ob die Preissignale im Transportsektor ausreichen werden, um** gemeinsam mit den vom EU-ETS abgedeckten Sektoren die notwendige **Verringerung der Gesamtemissionen zu erreichen** (SVR Wirtschaft, 2023). Die Grenzvermeidungskosten zur Erreichung von Klimaneutralität in der EU im Jahr 2050 könnten im Verkehrs- und

Gebäudesektor einen Preis von 200 bis 300 Euro je Tonne CO₂ notwendig machen (Kalkuhl et al., 2023). Der tatsächlich realisierte Preis hängt jedoch auch vom Umfang zusätzlicher Klimaschutzmaßnahmen durch Standards, Verbote oder Förderprogramme ab. Eine aktuelle Auswertung verschiedener Studien zu zukünftigen Preisen im EU-ETS II zeigt eine hohe Spanne der Preise zwischen 60 bis 380 Euro je Tonne CO₂ (Günther et al., 2024). Zu einem gewissen Grad erklärt sich diese Bandbreite durch unterschiedliche Modellansätze, zum Teil ist sie jedoch auch auf die Effektivität komplementärer Politikmaßnahmen zurückzuführen (Pahle, 2024). Es besteht insgesamt daher eine hohe Unsicherheit im Hinblick auf zukünftige CO₂-Preise im Verkehrssektor.

CO₂-spezifische Regulierung im Straßengüterverkehr

87. Auf deutschen Autobahnen und Bundesstraßen gilt seit dem Jahr 2005 eine Mautpflicht für schwere Nutzfahrzeuge. Die Einnahmen werden je zur Hälfte für Investitionen in die Bundesfernstraßen und die Schiene verwendet. Die EU hat beschlossen, dass die **LKW-Maut künftig an den CO₂-Ausstoß des Fahrzeugs gekoppelt** werden muss (EU-Richtlinie 2022/362). Dies wurde in Deutschland mit der jüngsten Mautreform umgesetzt. Seit dem 1. Dezember 2023 wird in Deutschland nun ein CO₂-Aufschlag in Höhe von 200 Euro je Tonne CO₂ erhoben. Dies entspricht dem in der EU-Richtlinie vorgesehenen Maximalbetrag (Bundesregierung, 2023a). [↪ KASTEN 13](#) Damit setzt sich die Maut aus vier Teilsätzen zusammen: Kosten der Infrastruktur, der Luftverschmutzung, der Lärmbelastung und des CO₂-Ausstoßes. Je nach Fahrzeugklasse beträgt der Mautteilsatz für den CO₂-Ausstoß zwischen 4,0 und 16,2 Cent je Kilometer. **Dadurch dürfte ein großer Teil der Klimakosten auf mautpflichtigen Straßen internalisiert** werden (UBA, 2020a). [↪ KASTEN 10](#) Emissionsfreie LKW werden bis Dezember 2025 vollständig von der LKW-Maut befreit. Danach müssen für sie nur die Mautteilsätze für Luftverschmutzung und Lärmbelastung in voller Höhe entrichtet werden. Der Mautteilsatz für die Infrastrukturkosten wird um 75 % ermäßigt, für den CO₂-Ausstoß wird kein Mautteilsatz erhoben. Die CO₂-basierten Maut-einnahmen des Bundes werden im Jahr 2024 voraussichtlich 6,8 Mrd Euro betragen und damit rund 45 % der gesamten Mauteinnahmen im Jahr 2024 ausmachen (Bundesregierung, 2023a).
88. Gleichzeitig sind auch die **Hersteller von schweren Nutzfahrzeugen** zur Dekarbonisierung ihrer Flotte verpflichtet. Im Jahr 2019 wurde eine europäische Regelung verabschiedet, die **für Hersteller schwerer Nutzfahrzeuge CO₂-Flottengrenzwerte** (in Gramm CO₂ pro tkm) festlegt (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union, 2019). Danach müssen sie die CO₂-Emissionen ihrer Flotte ab dem Jahr 2025 um 15 % gegenüber dem Referenzjahr 2019 senken. Andernfalls sind erhebliche Strafzahlungen zu leisten. Die Verschärfung der Flottenziele für die Jahre nach 2025 wurde vor Kurzem beschlossen. So müssen die CO₂-Emissionen ab dem Jahr 2030 um 45 % anstatt um bisher 30 % gegenüber dem Referenzwert gesenkt werden. Ab dem Jahr 2035 steigt das Reduktionsziel auf 65 % und ab dem Jahr 2040 auf 90 % an (Europäische Kommission, 2023a). Die Verordnung ist grundsätzlich technologieneutral. Es bleibt den Herstellern überlassen, wie sie die Flottenziele erreichen.

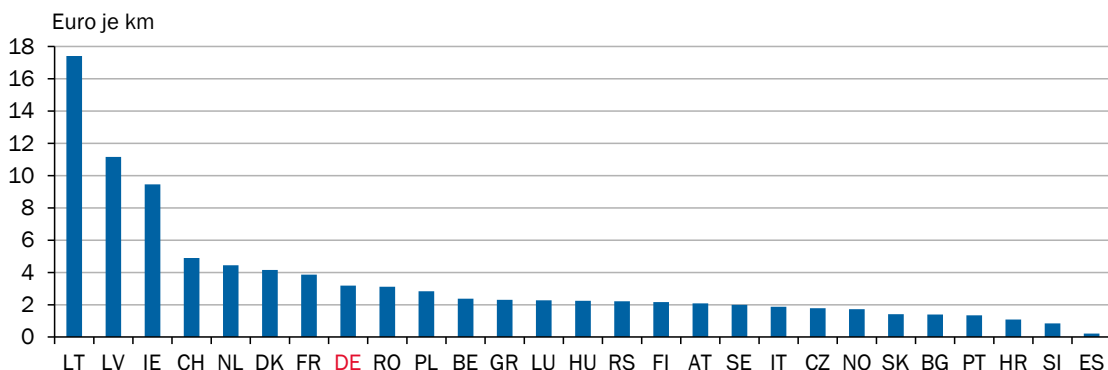
Kosten für Infrastrukturnutzung und Energie im Schienengüterverkehr

89. **Für die Nutzung der Schieneninfrastruktur** müssen die Verkehrsunternehmen **Trassenentgelte an die Betreiber der Schieneninfrastruktur** entrichten. Diese orientieren sich an EU-weit geltenden Entgeltgrundsätzen. Dabei ist festgelegt, dass die Verkehrsunternehmen mindestens die von ihnen unmittelbar verursachten marginalen Kosten zu tragen haben. Insgesamt sind die **Trassenentgelte für den Schienengüterverkehr in Deutschland im internationalen Vergleich nicht außergewöhnlich hoch**. [↪ ABBILDUNG 42](#) Zudem werden die Trassenentgelte für die Verkehrsunternehmen durch ein Förderprogramm der Bundesregierung derzeit um 31,5 % reduziert (DB InfraGO, 2024b). Für die Nutzung von Serviceeinrichtungen wie Güterterminals oder Abstellgleisen sind ebenfalls Entgelte zu entrichten. Insgesamt machten die Kosten für die Nutzung von Infrastruktur im Jahr 2022 rund 10 % des Umsatzes im Schienengüterverkehr aus (BNetzA, 2024a).
90. Neben den Infrastrukturentgelten müssen Schienenverkehrsunternehmen die **Stromkosten für den Betrieb ihrer Bahnen** tragen. Diese setzen sich aus dem Bezugspreis für den Fahrstrom, den Netzentgelten für das Bahnstromnetz, der Stromsteuer und weiteren Umlagen zusammen. [↪ ABBILDUNG 43](#) Der Bezugspreis für den Fahrstrom hat sich zwischen den Jahren 2020 und 2022 etwa verdreifacht, dürfte im Jahr 2023 aber wieder leicht zurückgegangen sein (BNetzA, 2024a). [↪ ABBILDUNG 43 LINKS](#) Die Abschaffung der EEG-Umlage zum 1. Juli 2022 führte zu einem deutlichen Rückgang der Abgabenlast. [↪ ABBILDUNG 43 RECHTS](#) Fahrstrom wird zudem bei der Stromsteuer und bei den Umlagen stark begünstigt. So liegt die Stromsteuer lediglich bei 56 % des Regelsatzes, die Umlagen bei 3,9 bis 10 % des jeweiligen Regelsatzes (BAFA, 2023; netztransparenz.de, 2023a, 2023b, 2023c; Zoll, 2024, §9 StromStG)

[↪ ABBILDUNG 42](#)

Trassenentgelte im Schienengüterverkehr in europäischen Ländern¹ im Jahr 2021

Trassenentgelt in Deutschland im europäischen Vergleich nicht besonders hoch



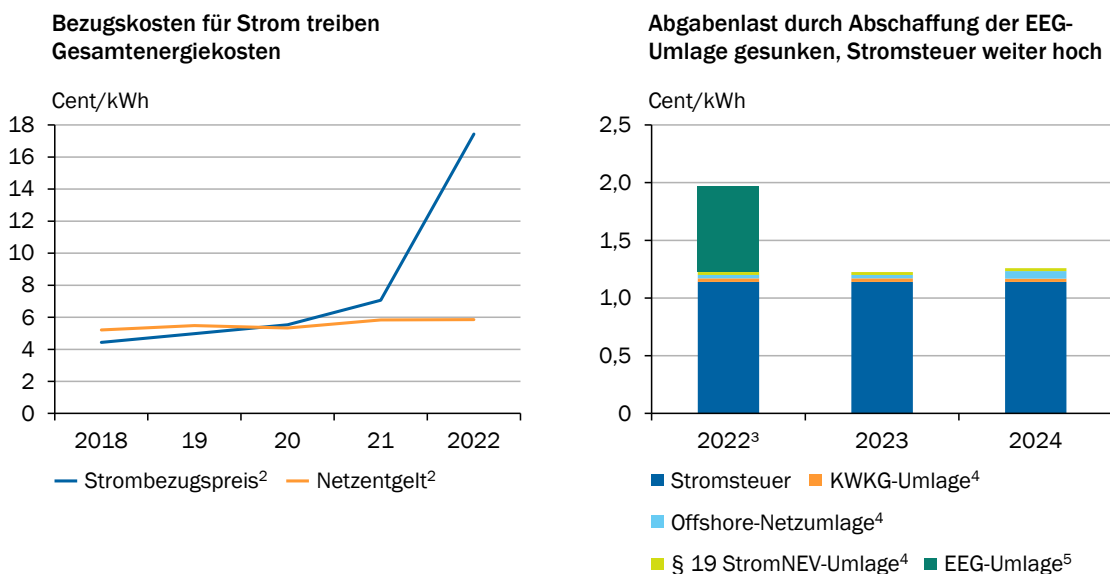
1 – LT-Litauen, LV-Lettland, IE-Irland, CH-Schweiz, NL-Niederlande, DK-Dänemark, FR-Frankreich, DE-Deutschland, RO-Rumänien, PL-Polen, BE-Belgien, GR-Griechenland, LU-Luxemburg, HU-Ungarn, RS-Serbien, FI-Finnland, AT-Österreich, SE-Schweden, IT-Italien, CZ-Tschechien, NO-Norwegen, SK-Slowakei, BG-Bulgarien, PT-Portugal, HR-Kroatien, SI-Slowenien, ES-Spanien.

Quellen: IRG-rail, eigene Berechnungen

© Sachverständigenrat | 24-095-01

▸ **ABBILDUNG 43**

Fahrstromkosten¹ im Schienenverkehr



1 – Ohne Mehrwertsteuer. 2 – Netto, ohne Steuern und Umlagen. 3 – Zusätzlich Abschaltbare Lasten-Umlage i. H. v. 0,003 Cent/kWh. 4 – Umlage für Strommengen ab einer Gigawattstunde. Für Strommengen darunter gilt ein höherer Umlagesatz. 5 – Auf 20 % begrenzte EEG-Umlage nach § 65 EEG, zum 1. Juli 2022 abgeschafft.

Quellen: Bundesnetzagentur, DB Energie, netztransparenz.de, Zoll, eigene Berechnungen
 © Sachverständigenrat | 24-104-01

▸ **KASTEN 13**

Fokus: Gesamtwirtschaftliche Effekte der Dekarbonisierung des Güterverkehrs

Die Dekarbonisierung des Güterverkehrs dürfte künftig zu höheren Kosten im Logistiksektor führen. Kosten dürften beispielsweise durch den Anstieg der Mautkosten entstehen, mittelfristig erhöhte Energiekosten für Strom (durch die zu amortisierenden Investitionen in die Lade- und Netzinfrastruktur) sowie höhere Anschaffungskosten für LKW mit emissionsarmen Antriebskonzepten. ▸ **ZIFFER 108** So dürfte die **Mauterhöhung** ▸ **ZIFFER 87** die **Transportkosten signifikant erhöhen**. Bisher haben Mautkosten im Durchschnitt einen Anteil von etwa 11 % der LKW-Transportkosten ausgemacht (G+S Magazin, 2021; Trimode, 2022; Transporeon, 2023). Im Lauf des Jahres könnte dieser Anteil auf etwa 18 % steigen (Transporeon, 2023). Kurzfristig führt neben Deutschland lediglich Österreich eine CO₂-Komponente bei der LKW-Maut ein, die zudem wesentlich geringer ist als die deutsche CO₂-Komponente. Dadurch könnte es zu Unterschieden in den Transportkosten innerhalb Europas kommen und Deutschland, als Vorreiter, einen Wettbewerbsnachteil haben.

Aus **erhöhten Transportkosten** entstehen **negative Produktivitätseffekte** (Branco et al., 2023). Logistikunternehmen dürften diesen Kostenanstieg in ihren Fixkosten und den variablen Kosten je Transportkilometer an ihre Kundinnen und Kunden weitergeben. Die Effekte dieser Kostenweitergabe sowie der Anteil des Kostenanstiegs, der weitergereicht wird, sind zum gegenwärtigen Zeitpunkt unsicher. Allerdings machen die Transportkosten nur einen kleinen Anteil der Gesamtkosten eines gehandelten Produktes aus. ▸ **ZIFFER 89** Da die innereuropäisch zurückgelegten Strecken nur einen Bruchteil des gesamten Transportwegs in **außer-europäische Absatzmärkte** ausmachen, dürften sich die steigenden Kosten nicht nennenswert auf die **internationale Wettbewerbsfähigkeit** deutscher Exporte auswirken. Langfristig dürften sich Steigerungen der Transportkosten zudem innereuropäisch angleichen, wenn sich z. B. die CO₂-

Komponenten in der Maut angleichen oder der EU-ETS II die CO₂-Emissionen des Transportsektors einheitlich bepreist. [↪ ZIFFER 85](#) Die **Nachfrage nach straßengebundenen Transporten ist wenig preissensitiv** (Musso et al., 2013; Blechschmidt et al., 2022). Beim Transport von Nahrungsmitteln wird die Preiselastizität beispielsweise auf $-0,02$ und bei Chemie und Düngemitteln auf $-0,19$ geschätzt, d. h. bei einem Preisanstieg des straßengebundenen Transports um 1 % je tkm sinkt die Nachfrage nach Transporten von Nahrungsmitteln (Chemie und Düngemitteln) in tkm um 0,02 % (0,19 %). Die Nachfrage nach Straßentransporten von besonders schwerer Fracht (mit 100 Tonnen oder mehr) reagiert hingegen mit einer Elastizität von $-2,9$ deutlich stärker auf Kostensteigerungen. Insgesamt dürften die Auswirkungen der Einführung der CO₂-Komponente und der damit einhergehenden durchschnittlichen Mauterhöhung für LKW auf die Fahrleistung gering ausfallen.

III. STRATEGIEN ZUR DEKARBONISIERUNG DES GÜTERVERKEHRS

91. **Um den Güterverkehr zu dekarbonisieren, können verschiedene Strategien** verfolgt werden: eine **Vermeidung von Transporten** und damit von THG-Emissionen, eine **Verlagerung von Transporten** auf emissionsärmere Verkehrsträger [↪ ZIFFER 71](#) sowie ein **Antriebswechsel** im Straßengüterverkehr. [↪ ZIFFER 102](#) Aufgrund der engen Beziehung zwischen Gütertransport und wirtschaftlicher Entwicklung ist eine umfassende Reduktion von Gütertransporten nicht zu erwarten. [↪ ZIFFER 60](#) Zwar können Effizienzsteigerungen insbesondere durch die Vermeidung von Leerfahrten und durch die Erhöhung des Auslastungsgrads oder den verstärkten Einsatz von Lang-LKW für großvolumige Waren einen Beitrag zur Dekarbonisierung des Güterverkehrs leisten, die Potenziale dürften allerdings insgesamt begrenzt bleiben. Die anderen beiden Strategien, Verlagerung und Antriebswechsel, werden im Folgenden näher beleuchtet und ihre Erfolgsaussichten für die Dekarbonisierung des Güterverkehrs eingeschätzt.

1. Gütertransporte auf Schiene und Wasserstraße verlagern

92. Da Straßentransporte aktuell die höchsten CO₂-Emissionen pro Tonnenkilometer verursachen, könnte eine **stärkere Nutzung von Schienentransporten und Binnenschiffen den CO₂-Ausstoß verringern**. [↪ TABELLE 13 ANHANG](#) Gemessen an der gesamten Güterverkehrsleistung stagniert der Anteil des Schienengüterverkehrs weitgehend. Im Jahr 2022 betrug er rund 18 %. [↪ ZIFFER 70](#) Der Anteil der Binnenschifffahrt ist sogar rückläufig. Das im Koalitionsvertrag formulierte Ziel der Bundesregierung, bis zum Jahr 2030 einen **Anteil des Schienengüterverkehrs von 25 % am Modal Split zu erreichen, dürfte bei der gegenwärtigen Dynamik nicht zu realisieren sein** (SPD, Bündnis 90/Die Grünen und FDP, 2021). [↪ ABBILDUNG 45 LINKS](#) [↪ ZIFFER 76](#)

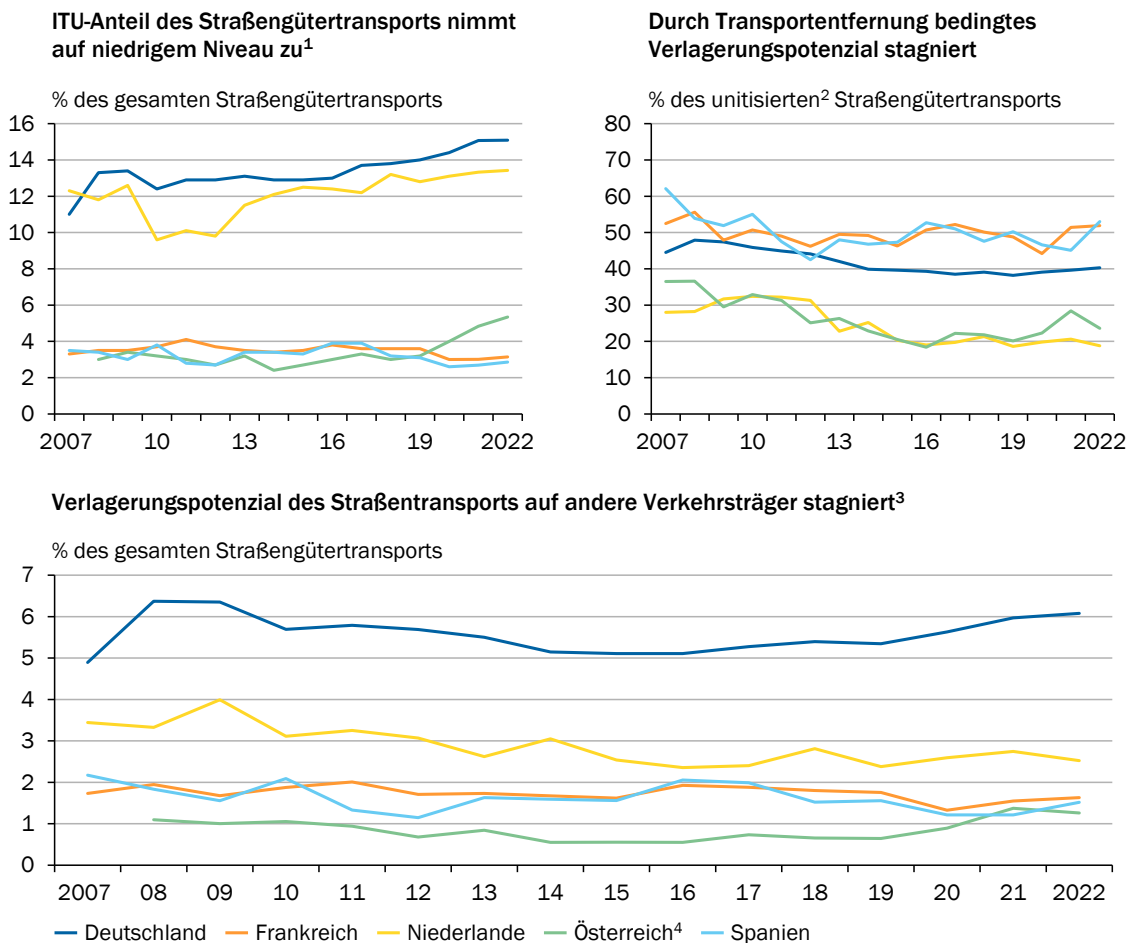
Geringes nachfrageseitiges Verlagerungspotenzial

93. Die **bestimmenden Faktoren für die Wahl des Transportmittels** sind die **Zugänglichkeit**, z. B. ob ein Gleisanschluss besteht oder ein Binnenhafen in der Region verfügbar ist, die **Transportdistanz**, die **Charakteristika der zu transportierenden Güter und Waren**, der **Umfang der Ladung** und die angestrebte **Transportzeit** (Tavasszy und van Meijeren, 2011). Da das Verladen von einem Transportmittel auf ein anderes zeitintensiv ist, wird ein intermodaler Transport unter Einbezug der Schiene meist nur von Nachfragern genutzt, die nicht auf zeitkritische Transporte angewiesen sind. Da für viele Waren und Vorprodukte allerdings die Lieferzeit kritischer ist (BNetzA, 2022a), ist der Anteil am gesamten Transportvolumen, für den eine Verlagerung vom Straßen- auf den Schienentransport ökonomisch sinnvoll ist, auf absehbare Zeit gering (Kreutzberger, 2004; Europäischer Rechnungshof, 2016; Puls, 2022; BNetzA, 2024a).
94. Zudem werden **die meisten Güter nicht in standardisierten Transportbehältern** wie Containern **transportiert**, sogenannten Intermodal Transport Units (ITU), die sich leicht zwischen Transportmitteln verladen lassen. Stattdessen werden, unter anderem aufgrund der geringen Gesamtsendungsgröße, wesentlich flexiblere Behälter wie z. B. Kartons oder Paletten genutzt. [↪ ABBILDUNG 44 OBEN LINKS](#) Etwa 40 % der straßengebundenen ITU-Transporte in Deutschland eignen sich aufgrund der Wegstrecke (über 300 km) für eine potenzielle Verlagerung von der Straße auf andere Transportmittel. [↪ ABBILDUNG 44 OBEN RECHTS](#) Da ITU-Transporte im gesamten straßengebundenen Transport allerdings nur einen Anteil von 15 % einnehmen, liegt das gesamte so bestimmte Verlagerungspotenzial in Deutschland bei 6 %. Im Vergleich zu anderen europäischen Ländern ist dieser Anteil hoch und steigt im Zeitverlauf leicht an. [↪ ABBILDUNG 44 UNTEN](#) Innovationen zur Weiterentwicklung von ITU, wie z. B. kleinere Subcontainer („Citybox“), und deren Handling bergen, unter anderem aufgrund von zeitintensiven Hürden für die Marktdurchdringung, erst mittelfristig Potenzial die Attraktivität von ITU-Transporten zu steigern (van Binsbergen et al., 2014; Europäische Kommission, 2022a; Kiani Mavi et al., 2022).
95. Eine starke **Verlagerung von Transporten**, insbesondere zeitkritischer kleinteiliger Güter (Kurier-, Express- und Paketdienste, Lebensmittel, Konsumgüter), **auf die Schiene wird** auch langfristig **nicht effizient sein** (Pinto et al., 2018; Puls, 2022). Für eine zumindest theoretische Möglichkeit, eine Verlagerung durchzuführen, fehlen unter anderem intermodale Hubs, die den kombinierten Güterverkehr ermöglichen und komplexere Logistikketten zulassen (Nothegger, 2023).
96. Der Schienengüterverkehr ist aufgrund der bedienten Transportmärkte insbesondere im grenzüberschreitenden Verkehr von Bedeutung. **Allerdings bestehen** historisch gewachsene **Inkompatibilitäten** der nationalen Eisenbahnnetze (Stoll et al., 2017). [↪ ZIFFERN 184 FF. ANHANG](#) Die EU hat es sich zum Ziel gesetzt, einen einheitlichen europäischen Eisenbahnraum zu schaffen. Um diesen zu stärken, ist der Ausbau der europäischen Eisenbahnkorridore im Transeuropäischen Verkehrsnetz (TEN-V-Netz) notwendig. [↪ ZIFFER 131](#) Für diesen Verkehr bestehen

schon intermodale Hubs, z. B. an den See- und Binnenhäfen sowie weiteren Umschlagplätzen. Die **Liberalisierung des Schienen(güter)verkehrs** im Lauf der 1990er- und 2000er-Jahre **innerhalb der EU hat jedoch nur geringfügige Veränderungen im Verkehrsaufkommen und bei der Wahl des Transportmittels bewirkt** (Eisenkopf et al., 2006). Aufgrund der unterschiedlichen Transportmärkte, die Schienengüterverkehr und LKW-Logistik bedienen, [ZIFFER 72](#) bedarf es mehr als einer reinen Zunahme des Wettbewerbs und sinkender relativer Preise des Schienengüterverkehrs gegenüber dem Straßenverkehr, um eine Verlagerung zu erreichen.

▸ **ABBILDUNG 44**

Gütertransport in standardisierten Transporteinheiten und Verlagerungspotenzial



1 – Anteil des gesamten Straßengütertransports (in tkm) der in Intermodal Transport Units (ITU) transportiert wird, d. h. standardisierten Transporteinheiten, die für den Transport mit verschiedenen Verkehrsträgern geeignet sind. Solche ITU umfassen Container, Wechselbehälter und andere (von der Größe her) standardisierte Verpackungen, die mit einfachen Geräten (z. B. Kränen) bewegt werden können. 2 – Verlagerungspotenzial im unitisierten Verkehr der Straße in Prozent des unitisierten Straßengüterverkehrs. „Unitisierung“ drückt den Anteil der gesamten transportierten Güter aus, der in ITU transportiert wird. 3 – Das Verlagerungspotenzial gibt den potenziell zu verlagernden Anteil des unitisierten Straßengütertransports in Prozent des gesamten Straßengüterverkehrs an. 4 – Der von Eurostat angegebene ITU-Anteil des Jahres 2007 für Österreich erscheint im Zeitverlauf unplausibel hoch (24,6 %) und wird daher, genauso wie das Verlagerungspotenzial im gesamten Straßengüterverkehr (9 %), in der Abbildung nicht gezeigt.

Quellen: Eurostat, eigene Berechnungen
© Sachverständigenrat | 24-113-01

97. Der Schienengüterverkehr bietet mit dem **Einzelwagenverkehr** [↪ GLOSSAR](#) grundsätzlich eine **Möglichkeit, auch kleinere Warenmengen mit der Bahn zu transportieren**. Kunden können dabei auch ohne direkten Gleisanschluss Güter in ITU per Bahn transportieren lassen. Innerhalb Deutschlands bietet momentan nur die DB Cargo AG flächendeckenden Einzelwagenverkehr an (DB Cargo, 2024a), allerdings ist dieser **Geschäftszweig seit Jahren defizitär** und machte im Jahr 2022 etwa die Hälfte des Gesamtverlusts von DB Cargo aus (Cordes, 2023). Gleichzeitig zeigen sich Kunden mit den Transportkosten unzufrieden (BNetzA, 2022a), was angesichts der fehlenden Konkurrenz und der hohen Defizite darauf hindeutet, dass die Kosten dieser Verkehrsart zu hoch sind, um im Verhältnis zum LKW-Transport ausreichend Nachfrage zu generieren. [↪ ZIFFER 198 ANHANG](#)

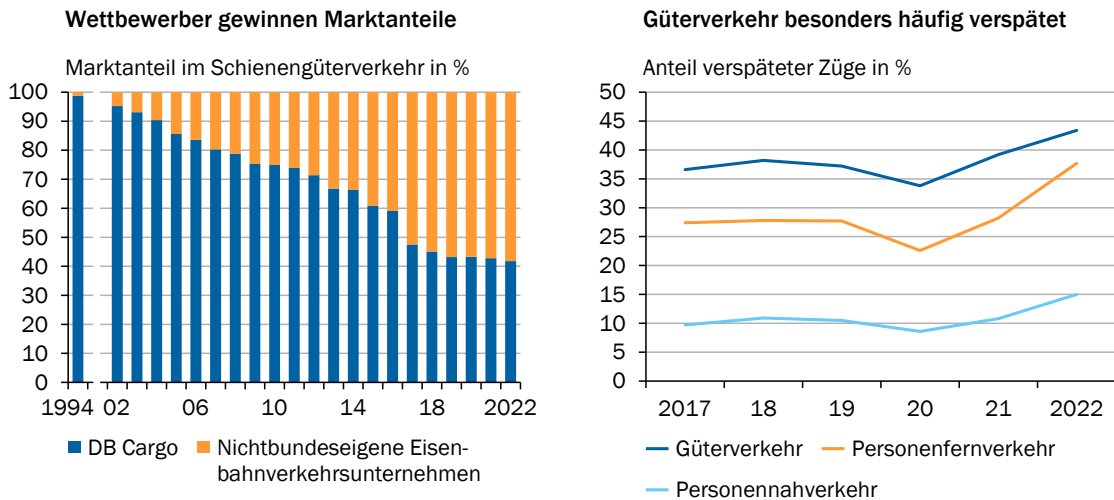
Verlagerung durch geringe Kapazität und Effizienz im Schienengüterverkehr nur eingeschränkt möglich

98. Selbst für Transporte, für die der Schienentransport eine Alternative zum Straßenverkehr darstellen könnte, [↪ ZIFFER 94](#) sind die tatsächlichen Verlagerungsmöglichkeiten aus anderen Gründen begrenzt. So hat das derzeitige **Schiennetz seine Kapazitätsgrenze erreicht** (DB, 2023a), was eine erhebliche Ausweitung des Schienengüterverkehrs verhindert (DB, 2023b, 2023c). Die Kapazität der Schiene wird durch **ineffiziente Prozesse** bei der Trassenzuteilung verknappt. [↪ ZIFFER 100](#) Vor allem führen die vielen, beispielsweise durch gestörte Weichen ausgelösten, Verspätungen dazu, dass Züge neu disponiert werden müssen. Dies geschieht bislang noch manuell, da automatisierte Systeme und Konnektivitäten zwischen Zügen und Leitstellen fehlen (Moosbrugger, 2008; Meirich, 2017; Eurailpress, 2023). [↪ ZIFFER 195 ANHANG](#)
99. Zudem ist **der Schienentransport momentan deutlich** langsamer und mit höheren Durchschnittsverspätungen verbunden als der Straßenverkehr. [↪ KASTEN 14](#) [↪ ABBILDUNG 45 RECHTS](#) Der Anteil der verspäteten Güterzüge lag im Jahr 2022 mit 43,4 % noch über dem im Personenfernverkehr mit 37,7 % (BNetzA, 2024a). [↪ ABBILDUNG 45 RECHTS](#) Vor allem im Einzelwagenverkehr ist die Unzufriedenheit der Kunden mit den generellen Transportzeiten und der Pünktlichkeit hoch (BNetzA, 2022a).

Die Deutsche Bahn nennt Baustellen als Hauptursache für den Anstieg der Verspätungen im Schienengüterverkehr im Jahr 2021 (Bundesregierung, 2022a). Allerdings sind die Verspätungszeiten schon seit Jahren erhöht. Ein **Umstieg auf den Schienentransport kann** deshalb **Umstellungen in Produktionsprozessen erforderlich machen**, die die betriebswirtschaftlichen Kosten erhöhen (just-in-time- und just-in-sequence-Ansätze müssten durch höhere Lagerhaltung und zusätzliche Pufferzeiten ersetzt werden). Allerdings sind die hohen Verspätungen ein endogenes Problem des schlechten Infrastrukturzustands und der hohen Kapazitätsauslastung. Eine deutliche Verbesserung des Zustands sowie ein Ausbau der Infrastruktur könnten die Verzögerungen und die dadurch entstehenden Ineffizienzen verringern.

ABBILDUNG 45

Wettbewerb und Pünktlichkeit im Schienenverkehr



Quellen: Bundesnetzagentur, DB
© Sachverständigenrat | 24-094-01

KASTEN 14

Hintergrund: Die Deutsche Bahn AG

Die **Deutsche Bahn AG (DB AG) dominiert den Schienenverkehr in Deutschland**. Im Jahr 2022 betrug ihr Anteil am Personennahverkehr 66 % und am Personenfernverkehr 96 %. Der Tochterkonzern DB Cargo AG erbrachte rund 41 % des Schienengüterverkehrs (BNetzA, 2024a). Zum 1.1.2024 wurden die Infrastruktursparten DB Netz AG und DB Station und Service AG in die gemeinwohlorientierte DB InfraGo AG verschmolzen. DB InfraGo AG betreibt rund 85 % des öffentlichen deutschen Schienennetzes, was einer Betriebslänge von mehr als 33 000 km entspricht (BNetzA, 2024a). Ihre Geschäftstätigkeit soll nach eigenen Angaben auf die Erreichung von drei politisch gesetzten Zielen ausgerichtet sein: die Verdoppelung der Verkehrsleistung im Schienenpersonenverkehr, die Steigerung des Marktanteils des Schienengüterverkehrs auf 25 % und die Umsetzung des Deutschlandtakts (DB InfraGO, 2024c).

Der **Bund ist Alleineigentümer der DB AG und verfassungsrechtlich zum Erhalt und Ausbau des Schienennetzes verpflichtet** (Artikel 87e GG). Während der Bund die Kosten für die Ersatzinvestitionen übernimmt, trägt die **DB AG die Kosten für die Instandhaltung**. Diese Zweiteilung führt zu Fehlanreizen für die DB AG, Instandhaltungsinvestitionen zu verzögern, bis Ersatzinvestitionen notwendig werden, die dann vom Bund zu finanzieren sind (Deutscher Bundestag, 2019). Die Folge sind Störungen und Verspätungen. Ob die DB AG ihrer Instandhaltungsverpflichtung ausreichend nachkommt und die gewährten Bundeszuschüsse für Ersatzinvestitionen nachhaltig einsetzt, soll anhand von Qualitätskennzahlen im Rahmen der LuFV überprüft werden, deren oberflächliche und unpräzise Ausgestaltung jedoch ebenfalls Fehlanreize setzt (Monopolkommission, 2019, 2023a). Inwiefern der geplante Nachtrag zur LuFV III und die neue LVInfraGO, die zum 1. Januar 2025 in Kraft treten soll, diese Fehlanreize adressiert, ist ungewiss (Bundesregierung, 2023b). Im Jahr 2023 erhielt die DB Netz AG Investitionszuschüsse in Höhe von 9,2 Mrd Euro aus öffentlichen Mitteln. Mit diesen Zuschüssen wurden im selben Jahr Infrastrukturinvestitionen in Höhe von 12,7 Mrd Euro getätigt (DB, 2024b).

Im Güterverkehr haben nicht-bundeseigene Eisenbahnunternehmen über Jahre Marktanteile hinzugewonnen, seit 2018 stagniert diese Entwicklung jedoch. [ABBILDUNG 45 LINKS](#) Im Jahr 2022 hatte der größte private Konkurrent der DB Cargo AG, Captrain Deutschland, einen Marktanteil von 6,1 % (mofair und Die Güterbahnen, 2023). [ABBILDUNG 45](#) Die DB Cargo AG schreibt

seit Langem Verluste, die sich im Jahr 2023 auf 583 Millionen Euro beliefen (DB Cargo, 2024b). [↪ ZIFFER 97](#) Auf Basis eines Ergebnisabführungsvertrags werden diese vollständig und unbefristet von der DB AG abgedeckt (DB Cargo, 2024b). Da der DB Cargo dadurch ungerechtfertigte Vorteile gegenüber Wettbewerbern entstehen könnten, hat die Europäische Kommission im Jahr 2022 ein Prüfverfahren eingeleitet (Europäische Kommission, 2022b). [↪ ZIFFER 198 ANHANG](#) Auch bei den nicht-bundeseigenen Güterverkehrsunternehmen lag die Umsatzrendite im Jahr 2022 aufgrund gestiegener Energie- und Personalkosten im negativen Bereich. Allerdings konnten sie in den Vorjahren stets eine positive Umsatzrendite von zwei bis vier Prozent erzielen (BNetzA, 2024a). Dennoch bestehen aufgrund der vertikal integrierten Konzernstruktur der DB AG weiterhin Hemmnisse für einen freien Wettbewerb auf der Schiene. Da der DB Konzern gleichzeitig Haupteigentümer und Nutzer der Schieneninfrastruktur ist, könnten andere Verkehrsunternehmen beispielsweise bei der Informationsweitergabe von Baustellenplanungen benachteiligt werden (Monopolkommission, 2023a).

100. Üblicherweise haben **Personenverkehre** in der Trassenbelegung **Vorrang gegenüber dem Güterverkehr**. Züge des Schienengüterverkehrs sind oftmals auf Strecken unterwegs, die auch von wesentlich schnelleren Zügen im Fernverkehr genutzt werden. Die Zuweisung der Trassen im Fahrplan erfolgt normalerweise nur bei Überschneidungen der Trassenbuchung nach Vorrangregeln. Diese Regeln sehen vor, dass vertakteten oder eingebundenen Verkehren [↪ GLOSSAR](#) die höchste Priorität eingeräumt wird, es folgen grenzüberschreitende Verkehre und zuletzt der Schienengüterverkehr (DB Netz, 2024). **Demnach wird eingebundenem, grenzüberschreitendem Güterverkehr die höchste Priorität eingeräumt**, was vor allem die TEN-V-Güterverkehrskorridore betrifft. [↪ ZIFFER 96 UND 184 FF.](#)

Der Schienengüterverkehr scheint also nur scheinbar benachteiligt, da er vor allem im getakteten Verkehr, also auf regelmäßig befahrenen Strecken, dem Personenverkehr gleichgestellt ist. **Auf der Strecke selbst**, d. h. nachdem die Trassenzuweisung im Fahrplan erfolgt ist, **besteht keine grundsätzliche Vorrangregel** der verschiedenen Verkehre gegeneinander (DB Netz, 2024). Allerdings führt die oftmals notwendige Neu-Disposition der Züge nach Störungen dazu, dass der langsamere Schienengüterverkehr den übrigen Zügen Vorrang einräumen muss, was Verspätungszeiten und Folgestörungen nach sich ziehen kann (BNetzA, 2015). [↪ ZIFFER 134](#)

101. Die Möglichkeiten für die **Verlagerung des Güterverkehrs auf Binnenschiffe** sind aus ähnlichen Gründen wie bei der Bahn **begrenzt**. Beispielsweise unterscheiden sich die bedienten Güter- und Transportmärkte stark vom typischen LKW-Transport (UBA, 2022). Die Transportkosten sind nur bei voll beladenen Binnenschiffen und Distanzen von über 200 km niedriger als im straßengebundenen Transport. Zudem ist das Wasserstraßennetz regional begrenzt und die Möglichkeit des Ausbaus der Wasserstraßen eingeschränkt (BMVI, 2020). Gleichzeitig ist Schiffsdiesel besonders emissionsintensiv in Partikeln und Stickoxiden [↪ TABELLE 13 ANHANG](#) und die saisonalen Unsicherheiten der Befahrbarkeit der Wasserstraßen nehmen aufgrund des Klimawandels zu. [↪ KASTEN 12](#)

2. Straßengüterverkehr dekarbonisieren

102. Um das gesetzte Ziel eines vollständig klimaneutralen Güterverkehrs bis zum Jahr 2045 zu erreichen, ist ein **steiler Markthochlauf emissionsarmer Nutzfahrzeuge in den kommenden Jahren erforderlich**. Die Bundesregierung (2019a) zielt mit ihrem Klimaschutzprogramm 2030 darauf ab, dass im schweren Straßengüterverkehr [↘ ZIFFER 83](#) bis zum Jahr 2030 ein Drittel der Fahrleistung elektrisch oder unter Verwendung strombasierter Kraftstoffe erbracht wird. Der heutige Straßenverkehr ist allerdings mit 97 % der LKW-Neuzulassungen noch von Diesel-LKW dominiert (ACEA, 2024).

BE-LKW mit höchster Marktreife für den Einsatz im Straßengüterverkehr

103. **Für den dekarbonisierten Straßengüterverkehr kommen unterschiedliche Antriebskonzepte in Frage**, die jeweils spezifische Vor- und Nachteile aufweisen. Hierzu gehören batterieelektrische Antriebe, Wasserstoffantriebe, Oberleitungen sowie Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor, die durch synthetische Kraftstoffe betrieben werden. Alle diese Technologien weisen unterschiedliche Reifegrade auf (Lischke, 2023). Zudem unterscheiden sie sich in Bezug auf Nutzlast, Energieeffizienz, Reichweite, Anschaffungs- und Betriebskosten sowie die Tank- bzw. Ladedauer. [↘ KASTEN 15](#) Darüber hinaus sind unterschiedliche Herausforderungen bei der Skalierung der Lade- und Tankinfrastruktur zu meistern (etwa bezüglich Flächenverfügbarkeiten, Koordination von Rast- sowie Lade- und Tankzeiten, Ausbau der Stromversorgung oder mit Blick auf die Wasserstoffverfügbarkeit). Zudem ist die Anschlussfähigkeit an die europäische Transformationsstrategie zu beachten.
104. **Im Güternah- und Verteilverkehr** bestehen mit heute bereits verfügbaren Reichweiten von batterieelektrischen LKW (BE-LKW) [↘ KASTEN 15](#) **wenig Zweifel an der techno-ökonomischen Machbarkeit eines flächendeckenden Einsatzes von BE-LKW**, auch aufgrund hoher Synergieeffekte mit batterieelektrischen PKW (BE-PKW; Link und Plötz, 2022; Tol et al., 2022; Winkler et al., 2022; Frieske et al., 2023; NOW, 2023a). Wie aktuelle Studien berichten, sind die Potenziale von batterieelektrischen Antrieben für den Güterfernverkehr in der Vergangenheit unterschätzt worden (Hoekstra, 2019; Liimatainen et al., 2019; McKinnon, 2021; Nykvist und Olsson, 2021; Bhardwaj und Mostofi, 2022). Die enormen technologischen Fortschritte der letzten zehn Jahre bei der Batteriezelle erlauben höhere Reichweiten (Löbberding et al., 2020) und eine erhebliche Verkürzung der Ladezeiten (Mukhopadhyay, 2019). Innerhalb der letzten Dekade sind zudem die Produktionskosten der Lithium-Ionen-Batterie um 85 % gesunken, weitere Kostenreduktionen sind zu erwarten (Orangi et al., 2024). Die Internationale Energieagentur (IEA) geht davon aus, dass weitere Innovationen in der Batteriechemie und -herstellung die durchschnittlichen Kosten für Lithium-Ionen-Batterien zwischen 2023 und 2030 um weitere 40 % senken werden (IEA, 2024). Bis zum Jahr 2030 besteht das Potenzial, durch weiter optimierte Batterietechnologien volumen- und gewichtseinsparende Innovationen voranzutreiben und damit die Reichweite von BE-LKW noch einmal deutlich zu steigern

(Thielmann et al., 2020). Der Einsatz von Natrium-Ionen-Batterien in Elektrofahrzeugen bietet zudem Potenziale für die Reduzierung von Rohstoffabhängigkeiten und für massive weitere Leistungssteigerungen (IEA, 2024).

Mit einer leistungsfähigen Ladetechnologie sind aus technologischer Sicht **rein batterieelektrische Anwendungen für alle Einsatzprofile im Güterverkehr denkbar** (Jöhrens et al., 2022; Tol et al., 2022; Zähringer et al., 2022; Alonso-Villar et al., 2023; Cheng und Lin, 2024; Plötz et al., 2024). Einige besonders anspruchsvolle Anwendungsfälle für Nutzfahrzeuge, beispielsweise im Bergbau, auf Baustellen, bei extremer Kälte oder Hitze sowie bei schwer planbaren mehrtätigen Fernverkehrstransporten, dürften sich auch zukünftig nur schwer elektrifizieren lassen. Sie könnten künftig parallel zum BE-LKW den Einsatz alternativer emissionsarmer Antriebstechnologien [↘ KASTEN 15](#) erforderlich machen. Im gesamten Straßengüterverkehr spielen solche Anwendungen jedoch nur eine Nischenrolle. [↘ ZIFFERN 70 FF.](#)

105. Aufgrund der höheren Energiedichte von komprimiertem Wasserstoff erlauben Brennstoffzellen-LKW (FCE-LKW) im Vergleich zu BE-LKW theoretisch höhere Reichweiten und eine kürzere Betankungsdauer im Vergleich zur Ladedauer. Diese in der Debatte häufig stark betonten **komparativen Vorteile beim Einsatz von Wasserstoff im LKW gegenüber dem batterieelektrischen Antrieb relativieren sich** jedoch zunehmend **durch die Entwicklung der Batterie- und Ladetechnik**, wodurch ein breiter Einsatz von FCE-LKW im Straßengüterverkehr immer weniger wahrscheinlich wird (Plötz et al., 2022; Albatayneh et al., 2023; Orangi et al., 2024). [↘ ZIFFER 104](#) Wasserstoff-Kraftstoffoptionen mit höheren Energiespeicherdichten, die zukünftig Reichweiten von bis zu 1 000 km bei einer Betankungsdauer von zehn bis fünfzehn Minuten ermöglichen könnten, befinden sich erst im Erprobungsstadium. Diese sowie weitere bestehende technische und marktliche Unsicherheiten hinsichtlich Fahrzeugen [↘ KASTEN 15](#) und Betankung [↘ KASTEN 17](#) verzögern die Marktreife von FCE-LKW. Auch weitere Antriebsoptionen für LKW wie Oberleitungs-Hybrid-LKW und synthetische Kraftstoffe stehen noch vor Hürden, bevor sie für einen Einsatz im Straßengüterverkehr denkbar wären. [↘ KASTEN 15](#) Insgesamt stellen **BE-LKW** daher **nach derzeitigem Stand für den Straßengüterverkehr** die Antriebstechnologie mit der **höchsten Marktreife** dar.
106. Zumindest kurz- bis mittelfristig unterscheiden sich die **Emissionsreduktionspotenziale, die im Straßengüterverkehr mit verschiedenen Antriebstechnologien realisiert werden können**. Aufgrund der hohen Laufleistung erlauben BE-LKW, trotz vergleichsweise hoher THG-Emissionen im Produktionsprozess, über den gesamten Lebenszyklus hinweg bereits beim heutigen Strommix deutliche Emissionsreduktionen (Wolff et al., 2020). Heutiger Wasserstoff wird nahezu ausschließlich aus fossilen Energieträgern gewonnen und lediglich 5 % der weltweiten Produktion werden gehandelt (Hebling et al., 2019). Die künftige Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff in Deutschland ist ungewiss (Odenweller et al., 2022). Für die Anwendung im Straßengüterverkehr bestehen zudem Nutzungskonflikte, insbesondere mit der Industrie, wo sich Anwendungen teilweise nicht oder nur schwer elektrifizieren lassen (Castelvecchi, 2022).

Verschiedene Metastudien zeigen eine extrem **hohe Bandbreite an Schätzungen zu zukünftigem Bedarf und Angebot an grünem Wasserstoff** in Deutschland in den Jahren 2030 und 2050 (Hebling et al., 2019; IRENA, 2022; Europäische Kommission, 2023b; Scheller et al., 2023). Wie viel grüner Wasserstoff künftig in Deutschland verfügbar sein wird, hängt einerseits von der künftigen inländischen Produktionsmenge ab, deren Wirtschaftlichkeit wiederum maßgeblich durch zukünftige Strom- und Importpreise bedingt wird (Scheller et al., 2023), und andererseits davon, ob Absichtserklärungen für Importvorhaben (BMBF, 2023) realisiert werden können. Trotz ehrgeiziger Ankündigungen kam der Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft zuletzt weltweit nur schleppend voran (IEA, 2022; Niemeier et al., 2024). Das **gilt auch für E-Fuels**, die heute noch nicht kommerziell verfügbar sind. Alle weltweit bis 2035 angekündigten neuen E-Fuel-Projekte entsprechen zusammen nur etwa 10 % der unverzichtbaren E-Fuel-Bedarfe Deutschlands (Ueckerdt et al., 2021; Ueckerdt und Odenweller, 2023). Es ist daher insgesamt nicht zu erwarten, dass diese Technologien in nennenswertem Umfang zur Erreichung der Emissionsziele 2030 [↘ ZIFFERN 80 UND 102](#) beitragen können.

107. Im Zuge der Antriebswende rückt die **Verfügbarkeit und verlässliche Versorgung mit Rohstoffen** zunehmend in den Fokus (Backhaus, 2021). Dies gilt **für BE-LKW und FCE-LKW in gleicher Weise**. Beide Antriebsarten basieren auf dem Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien und elektrischen Traktionsmotoren als Schlüsseltechnologien, die wiederum auf die Verfügbarkeit von Lithium, Kobalt und Seltenen Erden angewiesen sind (Thielmann et al., 2020). Die Produktion von Brennstoffzellen hängt zudem von der Verfügbarkeit weiterer kritischer Rohstoffe, wie beispielsweise Platin, ab (JG 2022 Tabelle 24). **Für weite Teile der Wertschöpfungsketten besteht** auf der Anbieterseite eine **starke Länderkonzentration**. Für Lithium-Ionen-Batterien und Elektromotoren sind Unternehmen aus China dominante Anbieter, für Platinmetalle sind dies Anbieter aus Südafrika und Russland (Buchert et al., 2023; JG 2022 Ziffern 486ff.). Durch die verschiedenen bereits angestoßenen europäischen Initiativen zur Batterieproduktion kann sich Europa künftig strategisch unabhängiger von anderen Ländern aufstellen (T&E, 2023).

Die Elektrifizierung des LKW-Verkehrs, sowohl durch BE-LKW als auch durch FCE-LKW, **erlaubt große Treibhausgasminderungen bei vergleichsweise geringen zusätzlichen Rohstoffbedarfen** (Buchert et al., 2023). Durch Innovationen bei der Produktion von Schlüsselkomponenten für die Antriebswende lassen sich Rohstoffabhängigkeiten weiter deutlich reduzieren (Dühnen et al., 2020; IEA, 2024). So kann beispielweise die Natrium-Ionen-Batterie gänzlich ohne kritische Rohstoffe hergestellt werden und bietet zudem Chancen für Wertschöpfung in Deutschland (Fraunhofer IKTS, 2023). Nichtsdestotrotz sollten beim Hochlauf emissionsarmer Antriebe Recycling- und Zweitnutzungspotenziale für Schlüsselrohstoffe konsequent erschlossen werden (Buchert und Sutter, 2020).

↳ KASTEN 15

Hintergrund: Alternative Antriebstechnologien für LKW

Bei **batterieelektrischen LKW** (BE-LKW) wird ein Batteriespeicher im Fahrzeug verbaut und der Antrieb erfolgt strombasiert über einen oder mehrere Elektromotoren. Die Alltagstauglichkeit und Wirtschaftlichkeit von BE-LKW hängt wesentlich von der Entwicklung der Batterietechnologie ab. Die enormen Innovationssprünge der vergangenen Jahre bei der Batterieentwicklung ermöglichen heute Reichweiten schwerer Nutzfahrzeuge von etwa 500 km ohne signifikante Einbußen bei der Nutzlast, weitere Innovationssprünge sind zu erwarten. [↳ ZIFFER 104](#) Bei allen großen deutschen Nutzfahrzeugherstellern sind BE-LKW bereits bestellbar.

In **Brennstoffzellen-LKW** (FCE-LKW) wird Wasserstoff in Strom für den elektrischen Antriebsstrang umgewandelt. Hersteller erproben aktuell für den Güterfernverkehr geeignete Fahrzeuge mit Reichweiten von bis zu 1 000 Kilometern. Dies erfordert Wasserstofftanks mit größerer Speicherkapazität als bisher (Frieske et al., 2023; Zerhusen et al., 2023). Hierfür bestehen noch Forschungs- und Entwicklungsbedarfe (NWR, 2023a; Zerhusen et al., 2023). Zudem herrscht noch Unsicherheit darüber, ob Wasserstoff in FCE-LKW künftig in gasförmigem oder flüssigem Zustand eingesetzt wird. Nutzfahrzeughersteller erwarten die Technologie- und Serienreife für FCE-LKW daher erst gegen Ende des Jahrzehnts (NOW, 2023a). Aufgrund der Umwandlungsprozesse bei der Herstellung und dem Transport von Wasserstoff sowie der Rückverstromung im Fahrzeug ist der technische Wirkungsgrad von FCE-LKW deutlich schlechter als bei direkter batteriebetriebener Stromnutzung (Hosseini und Butler, 2020).

Eine weitere Option der Energieversorgung von Nutzfahrzeugen ist die direkte Bereitstellung der **Antriebsenergie aus** an der Fahrbahn installierten **Oberleitungssystemen**. Oberleitungs-Hybrid-LKW nutzen den Strom einer Oberleitung und legen Strecken abseits der Oberleitungen mit einer Batterie zurück. Sie haben den Vorteil, dass das Batteriesystem während der Fahrt geladen werden kann, wodurch Standzeiten zum Nachladen vermieden oder reduziert werden können. Die Technologie von Fahrzeugen und Infrastruktur hat derzeit noch keine Serienreife. Nutzfahrzeughersteller schreiben der Antriebstechnologie **insgesamt nur ein geringes Marktpotenzial** zu (NOW, 2023a).

Als Alternative zur Elektrifizierung von Antrieben wird diskutiert, **LKW** mit Verbrennungsmotoren künftig **mit synthetischen Kraftstoffen** aus erneuerbarem Strom (E-Fuels) zu betreiben. Synthetische Kraftstoffe haben den Vorteil der Nutzung weitestgehend bestehender Antriebstechnik sowie einer etablierten Versorgungsinfrastruktur und sind damit theoretisch unmittelbar einsatzbereit. Allerdings werden E-Fuels bisher nur in Demonstrations- und Pilotanlagen hergestellt und sind, auch aufgrund hoher Herstellungskosten, **noch weit von der Möglichkeit einer flächendeckenden Versorgung entfernt** (Ueckerdt et al., 2021). LKW mit Verbrennungsmotoren können auch mit synthetisch hergestellten Kraftstoffen aus biogenen Rest- und Abfallstoffen (z. B. Biodiesel) betrieben werden. Ihre CO₂-Bilanz ist von einer Vielzahl an Einflussfaktoren abhängig und kann von einer großen Emissionseinsparung bis hin zu einer Erhöhung der Emissionen gegenüber LKW mit konventionellen Kraftstoffen führen (Wietschel et al., 2019). Aufgrund des begrenzten Biomassepotenzials von heimischen Reststoffen ist ungewiss, in welchem Umfang solche Kraftstoffe künftig zur Verfügung stehen können.

Alternative Antriebe können gegenüber dem Diesel zeitnah Wirtschaftlichkeit erreichen

108. Der Straßengüterverkehr ist durch einen hohen Wettbewerbsdruck gekennzeichnet, der sich in sehr geringen Preissetzungsspielräumen widerspiegelt (Wieland, 2010; DSGVO, 2023). **Für den Markterfolg** einer Antriebstechnologie **sind** daher **konkurrenzfähige Gesamtbetriebskosten (Total Costs of Ownership, TCO) entscheidend.** [↘ PLUSTEXT 3](#)



[↘ PLUSTEXT 3](#)

Begriffserklärung: Total Costs of Ownership (TCO)

Gesamtbetriebskosten (Total costs of ownership, TCO) berücksichtigen nicht nur die Anschaffungskosten eines Fahrzeugs, sondern **alle Aspekte der späteren Nutzung** wie Energiekosten, Reparaturkosten oder Wartungskosten **über den gesamten Lebenszyklus** hinweg. Ein einheitliches Modell für die TCO-Berechnung existiert nicht. So werden teilweise auch Versicherungskosten, Infrastrukturkosten oder Kfz-Steuern in TCO-Kalkulationen berücksichtigt. Der Restwert eines Fahrzeugs wird für alle alternativen Antriebsarten gleich berechnet, weil die Unsicherheiten über eine Nachnutzung gleichermaßen hoch sind, und ergibt sich durch Abschreibung des Kaufwerts mit einer jahres- oder kilometerabhängigen Rate. Der Verschleiß der Batterie wird bei BE-LKW gesondert berücksichtigt. In einigen Studien werden zudem staatliche Steuerungsinstrumente wie die CO₂-Bepreisung oder die LKW-Maut mit einbezogen.

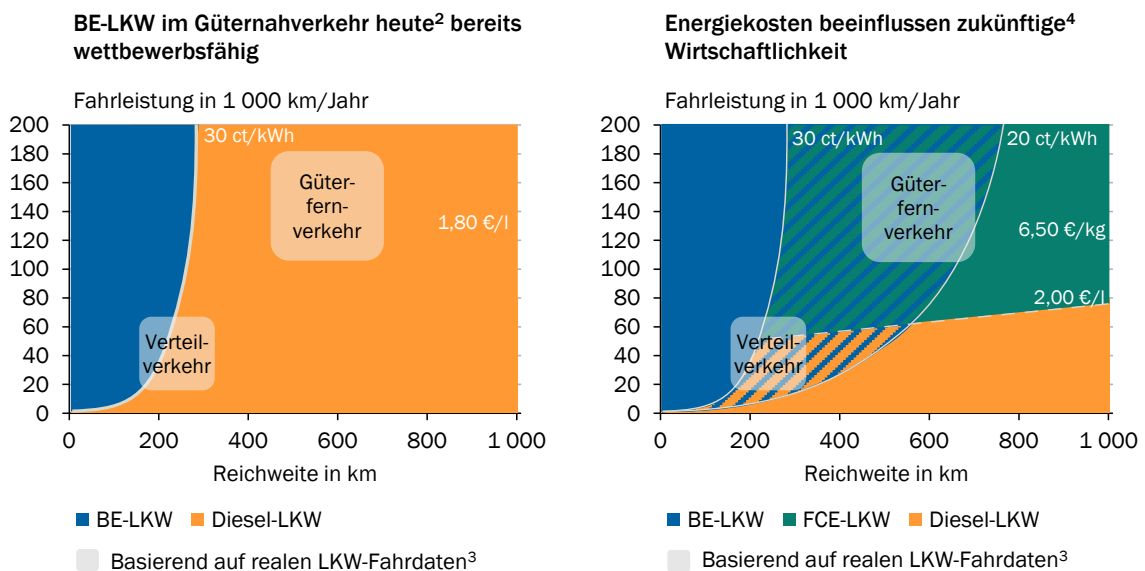
109. Eine TCO-Kostenberechnung auf Basis heutiger Herstellkosten der Fahrzeugkomponenten und unter Berücksichtigung von Betriebs- und Instandhaltungskosten zeigt, dass der **Güternahverkehr und Teile des Verteilverkehrs** bis ca. 300 km Reichweite bereits bei heutigen Energiepreisen **am wirtschaftlichsten durch BE-LKW abgedeckt** werden können. [↘ ABBILDUNG 46 LINKS](#) Dies deckt sich mit den Ergebnissen anderer Studien (Link und Plötz, 2022). Solche Anwendungsfälle umfassen ca. 75 % aller LKW-Transporte und damit bereits einen Großteil der inländischen Straßengütertransporte. [↘ ZIFFER 72](#) Dass der heutige Straßengüterverkehr trotzdem durch Diesel-LKW geprägt ist, [↘ ZIFFER 102](#) dürfte maßgeblich auf die noch nicht flächendeckend vorhandene Ladeinfrastruktur für BE-LKW zurückzuführen sein. Anwendungsfälle mit höherer Reichweite und höherer Fahrleistung werden hingegen heute noch am wirtschaftlichsten durch Diesel-LKW abgedeckt. Bei heutigen Preisen für Wasserstoff erreicht dieser auch bei hoher Reichweite und Fahrleistung keine Wirtschaftlichkeit gegenüber dem Diesel-LKW. [↘ ABBILDUNG 46 LINKS](#)
110. Durch den nationalen CO₂-Preis, die CO₂-Komponente der LKW-Maut und perspektivisch das EU-ETS II [↘ ZIFFER 85](#) wird der Betrieb von Diesel-LKW in den kommenden Jahren zunehmend teurer und unattraktiver werden. **Steigt der Diesel-Preis, werden BE-LKW und FCE-LKW relativ zum Diesel-LKW automatisch wirtschaftlicher**, während andere technisch mögliche Optionen [↘ KASTEN 15](#) in den Hintergrund rücken. [↘ ABBILDUNG 46 RECHTS](#) Der BE-LKW gewinnt

dann vom Nah- und Verteilverkehr ausgehend gegenüber dem Diesel-LKW Wirtschaftlichkeit hinzu, der FCE-LKW zunächst für sehr hohe Reichweiten und Fahrleistungen, die im Güterverkehr praktisch keine Rolle spielen.

111. Welcher Antrieb künftig als **wirtschaftlichster emissionsarmer LKW-Antrieb den Straßengüterfernverkehr** bedienen kann, wird maßgeblich durch das Verhältnis der zukünftigen Marktpreise von Strom zu Wasserstoff beeinflusst. Die dargestellte TCO-Kostenberechnung zeigt, dass bei einem künftigen Preis für Ladestrom von 20 Cent je kWh BE-LKW praktisch den gesamten Güterfernverkehr in Deutschland wirtschaftlicher abdecken könnten als alternative Antriebsarten. [↪ ABBILDUNG 46 RECHTS](#) Wenn der Strompreis unverändert bei 30 Cent je kWh bleibt, aber der Wasserstoff-Kraftstoffpreis künftig unter 6,50 Euro je kg fällt, sind in der Berechnung hingegen FCE-LKW die wirtschaftlichste Option für den Güterfernverkehr. Diese Ergebnisse decken sich mit anderen Studien zur TCO-Kostenparität (Ahluwalia et al., 2022; Basma et al., 2022). Zu berücksichtigen ist bei dieser Betrachtung allerdings, dass FCE-LKW aufgrund ihres geringeren technischen Wirkungsgrads [↪ KASTEN 15](#) etwa doppelt so viel eingesetzte Energie für die gleiche Strecke benötigen wie BE-LKW.
112. Welche Erzeugungskosten und Marktpreise sich für Strom und Wasserstoff zukünftig tatsächlich einstellen werden, hängt von verschiedenen Faktoren ab und

[↪ ABBILDUNG 46](#)

Gesamtbetriebskosten nach Fahrleistung und Reichweite¹



1 – Gesamtbetriebskosten basierend auf aktuellen Herstellkosten der Fahrzeugkomponenten (Brennstoffzelle 130 Euro je kW, Wasserstofftank 415 Euro je kg und Batteriepack 120 Euro je kWh) sowie Kosten für Betrieb und Instandhaltung basierend auf König et al. (2021). Gezeigt wird der Antrieb mit den jeweils niedrigsten Gesamtkosten. 2 – Bei einem Marktpreis für Ladestrom von 30 Cent je kWh, einem Diesel-Preis an der Tankstelle von 1,80 Euro je Liter und einem Wasserstoff-Kraftstoffpreis von 10 Euro je kg. In diesem Szenario hat der FCE-LKW für keinen Anwendungsfall die günstigsten Gesamtbetriebskosten. 3 – Die eingezeichneten Einsatzgebiete „Verteilverkehr“ und „Güterfernverkehr“ basieren auf realen LKW-Fahrdaten deutscher Flottenbetreiber nach Balke und Adenaw (2023). 4 – Bei einem Marktpreis für Ladestrom zwischen 20 Cent je kWh und 30 Cent je kWh, einem Diesel-Preis an der Tankstelle von 2 Euro je Liter und einem Wasserstoff-Kraftstoffpreis von 6,50 Euro je kg.

Quellen: Balke und Adenaw (2023), Wolff et al. (2020), Wolff und Balke (2024), eigene Darstellung
© Sachverständigenrat | 24-100-02

ist mit hoher Unsicherheit behaftet (World Energy Council, 2021; EWI, 2022; Pehnt et al., 2023; vbw, 2023; Wietschel et al., 2023). Abhängig davon, wo geladen wird, [↪ ZIFFER 116](#) unterscheidet sich der **Marktpreis für Ladestrom**. Besonders teuer dürfte für LKW künftig das Schnellladen entlang der Autobahn sein (Hildermeier und Jahn, 2024). Das Laden im privaten Depot dürfte, auch aufgrund der bestehenden Potenziale für die Vor-Ort-Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energiequellen, [↪ KASTEN 16](#) erheblich günstiger sein. Insgesamt halten verschiedene Studien einen durchschnittlichen Marktpreis für Ladestrom von LKW **zwischen 20 und 30 Cent je Kilowattstunde (kWh) im Jahr 2030** für realistisch (Jöhrens et al., 2022; Göckeler et al., 2023).

Wasserstoff-Kraftstoffkosten liegen heute meist in einem Bereich von 10 bis 15 Euro je kg. Mittelfristig **könnten sich** diese, Studien zufolge, **auf 4 bis 6 Euro je kg reduzieren lassen. Erforderlich für einen solchen Kostenrückgang wären jedoch Skaleneffekte entlang der gesamten Wertschöpfungskette, staatliche Förderung** sowie eine hohe Auslastung der Versorgungs- und Betankungsinfrastruktur (Basma et al., 2022; Zerhusen et al., 2023). Dies unterstellt außerdem, dass der Verkauf von Wasserstoff an der Tankstelle wie **bislang steuer- und abgabenfrei** erfolgt und keine Internalisierung der staatlichen Kosten für den Aufbau des Wasserstoffnetzes erfolgt. Die oben unterstellten Marktpreise für Strom bestehen hingegen etwa zur Hälfte aus Steuern, Abgaben und gesetzlich regulierten Netzentgelten. Ein Vergleich von Strom- und Wasserstoffpreis ist deshalb zuungunsten des Marktpreises für Strom verzerrt. Sollten künftig, analog zum Strompreis, auch für Wasserstoff Steuern, Abgaben und Netzentgelte erhoben werden, dürften Marktpreise für Wasserstoff-Kraftstoff deutlich höher als die hier genannten steuerfreien Preise liegen.

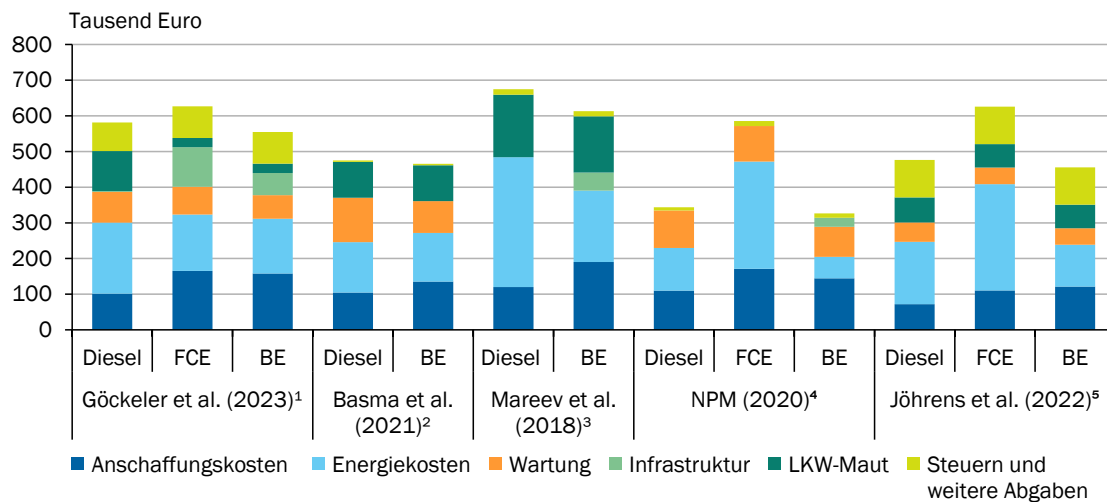
- 113. Für die Wirtschaftlichkeit der neuen Antriebstechnologien ist auch der Zweitmarkt für LKW relevant.** Während heute ein Großteil gebrauchter Diesel-LKW nach Afrika und Süd-/Osteuropa abgesetzt werden kann, können LKW mit alternativen Antrieben nur dort sinnvoll eingesetzt werden, wo eine entsprechende Infrastruktur vorhanden ist. Aufgrund der bestehenden Unsicherheit darüber ist der Residualwert von Diesel-LKW höher als der von LKW mit alternativen Antrieben. [↪ PLUSTEXT 3](#)

Die **Nachnutzungsoptionen für LKW mit alternativen Antrieben** sind aktuell **noch unsicher**. Die Lebensdauer von BE-LKW und ihrer wichtigsten Komponente, der Batterie, könnte zukünftig jedoch, anders als beim Diesel-LKW oder dem FCE-LKW, nicht mehr synchron verlaufen. Neue Geschäftsmodelle zielen darauf ab, BE-LKW nach Ende der Lebensdauer der Batterie weiter auf dem Erstmarkt zu nutzen, nachdem sie mit einer neuen oder aufbereiteten Batterie aufgerüstet wurden (Berylls, 2023). Die **Restwerte von Fahrzeug und Batterie könnten dann fortan getrennt betrachtet werden**. Second-Life-Anwendungen aus gebrauchten Batterien haben das Potenzial, die Gesamtbetriebskosten des BE-LKW gegenüber anderen alternativen Antriebstechnologien deutlich zu verbessern (Lebeau et al., 2019). Und schließlich lässt sich durch Recycling der Batterie ihr Materialwert nutzen. Aufgrund der Umweltwirkungen bei Rohstoffgewinnung, Herstellung und Entsorgung ist Batterierecycling ohnehin erstrebenswert (Thielmann et al., 2020). [↪ ZIFFER 107](#)

- 114.** Die **Wettbewerbsfähigkeit von Technologieoptionen** lässt sich **durch staatliche Steuerungsinstrumente entscheidend beeinflussen**. So stellen beispielsweise die Steuern und Zuschläge, die in Deutschland auf die Stromproduktion und -übertragung erhoben werden, einen entscheidenden Hebel für günstigere Strompreise dar und haben somit, neben steigenden fossilen Kraftstoffkosten, Einfluss auf das Erreichen der TCO-Parität des BE-LKW mit dem Diesel-LKW (Basma et al., 2021; Bushnell et al., 2021). [↘ ZIFFER 147](#) Die künftige Rolle von BE-LKW und FCE-LKW im Straßengüterfernverkehr hängt daher auch von den politisch gesetzten Rahmenbedingungen ab, der weiteren technologischen Entwicklung und der Verfügbarkeit von Infrastrukturen.
- 115.** Werden solche weiteren Faktoren, insbesondere die Kosten für den Aufbau der Energieinfrastruktur, die Energieeffizienz und staatliche Steuerungsinstrumente wie die LKW-Maut mit einbezogen, zeigen verschiedene Studien, dass **BE-LKW auch im Güterfernverkehr bereits im Jahr 2030 vergleichbare Gesamtbetriebskosten wie Diesel-LKW** erzielen können (Mareev et al., 2018; NPM, 2020; Basma et al., 2021; Wolff et al., 2021; Jöhrens et al., 2022; Tol et al., 2022; Burke et al., 2023). In den betrachteten Studien besteht eine große Heterogenität hinsichtlich der Annahmen beispielsweise zu Einsatzprofilen und Energiekosten in verschiedenen berechneten Szenarien. Insgesamt kommen sie jedoch

[↘ ABBILDUNG 47](#)

Schätzungen der Gesamtbetriebskosten verschiedener LKW-Antriebsarten im Jahr 2030
BE-LKW im Güterfernverkehr verschiedenen Studien zufolge künftig wettbewerbsfähig gegenüber dem Diesel-LKW



1 – Gesamtbetriebskosten für eine Sattelzugmaschine (40 t) mit Jahresfahrleistung von 120 000 km. Anschaffungsjahr 2030. BE-LKW mit Reichweite 600 km. Szenario „recharge2035“. 2 – Gesamtbetriebskosten für eine Sattelzugmaschine (40 t) mit Gesamtfahrleistung von 790 000 km nach 5 Jahren. Anschaffungsjahr 2029. BE-LKW mit 500 km Reichweite. Energiekosten beinhalten die Kosten für öffentliche und private Ladeinfrastruktur. 3 – Gesamtbetriebskosten für eine Sattelzugmaschine (40 t) mit Gesamtfahrleistung von 939 640 km. Anschaffungsjahr 2030. Batteriekapazität von 600 kWh. „Average Route“, Szenarien 1 & 7. 4 – Gesamtbetriebskosten für eine Sattelzugmaschine (40 t) mit Nutzungsdauer von 6 Jahren. Anschaffungsjahr 2030. Szenario ohne staatliche Steuerungsinstrumente mit sinkenden Fahrzeugpreisen. Ohne Kosten für Ausfalltage. Nur Anschaffungskosten der privaten Ladeinfrastruktur bei BE-LKW berücksichtigt. Kosten der öffentlichen Ladeinfrastruktur (BE, FCE) nicht berücksichtigt. 5 – Gesamtbetriebskosten für ein schweres Nutzfahrzeug (> 26 t) mit Gesamtfahrleistung von 468 100 km bis Verkauf. Anschaffungsjahr 2030. Ohne Arbeitskosten und keine Berücksichtigung der Kosten für private und öffentliche Ladeinfrastruktur (BE, FCE).

Quellen: Basma et al. (2021), Göckeler et al. (2023), Jöhrens et al. (2022), Mareev et al. (2018), NPM (2020), eigene Berechnungen
© Sachverständigenrat | 24-107-01

zum Ergebnis, dass BE-LKW bereits in näherer Zukunft eine Wirtschaftlichkeit gegenüber Diesel-LKW und FCE-LKW im Straßengüterfernverkehr erreichen können. [↪ ABBILDUNG 47](#)

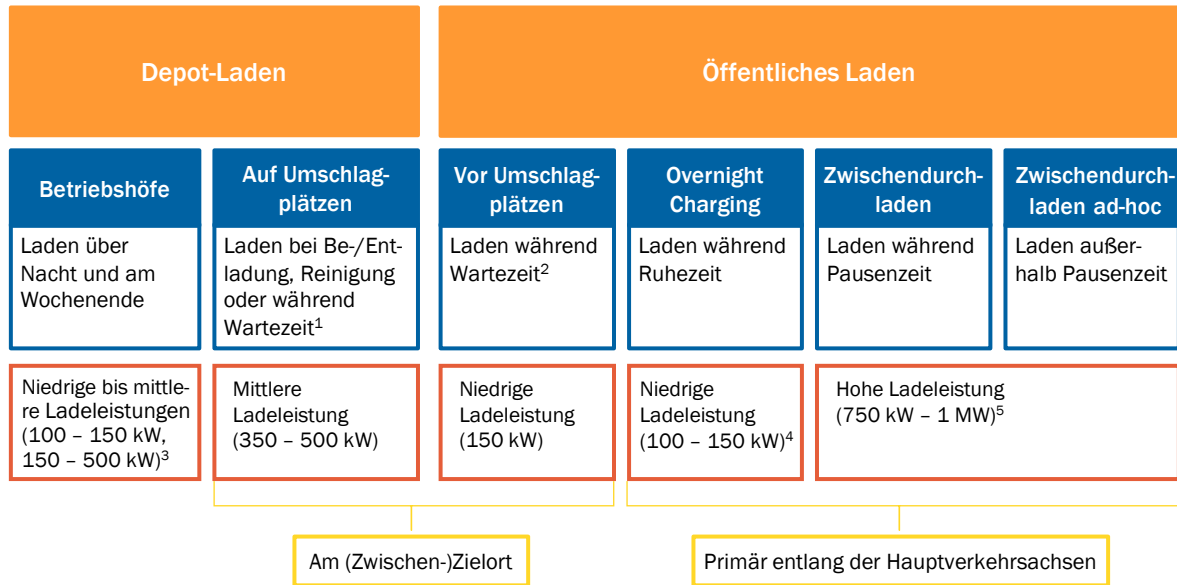
Die Anschaffungskosten für BE-LKW liegen in den Studien noch deutlich höher als beim Diesel-LKW, doch werden sie durch geringere Betriebskosten kompensiert. [↪ ABBILDUNG 47](#) **FCE-LKW** sind hingegen mit vergleichsweise hohen **Anschaffungskosten und Betriebskosten** verbunden, die aus heutiger Sicht auch perspektivisch **über denen von BE-LKW** liegen dürften (Tol et al., 2022; Göckeler et al., 2023). [↪ ABBILDUNG 47](#) Eine Kostenparität mit dem Diesel-LKW kann dadurch erst deutlich später als beim BE-LKW (NPM, 2020; Burke et al., 2023) und selbst das nur unter optimistischen Annahmen zum künftigen Wasserstoffpreis (Jöhrens et al., 2022) und für einen begrenzten Teil der Einsatzprofile innerhalb der EU mit sehr hohen Transportdistanzen (Tol et al., 2022) erreicht werden.

Alternative Antriebe benötigen eine alternative Energieinfrastruktur

- 116. Für emissionsarme Alternativen zum Diesel-LKW muss eine öffentlich zugängliche Versorgungsinfrastruktur aufgebaut werden.** Während FCE-LKW auf eine öffentlich zugängliche Tankstelleninfrastruktur angewiesen sind, ist beim Aufbau der Ladeinfrastruktur für BE-LKW zwischen verschiedenen Ladeszenarien zu unterscheiden, die sich vielfach auch im privaten Depot realisieren lassen. [↪ ABBILDUNG 48](#) Simulationen basierend auf heutigen LKW-Fahrprofilen zeigen, dass sich in Deutschland und Europa [↪ ABBILDUNG 55 ANHANG](#) mittelfristig der überwiegende Teil der Gütertransporte allein mit betrieblicher Ladeinfrastruktur realisieren lässt (Speth und Plötz, 2024). Dies deckt sich mit den Ergebnissen vergleichbarer Studien. Zwar ist im Güterfernverkehr, der in Deutschland den Großteil der THG-Emissionen des Straßengüterverkehrs ausmacht, der Bedarf für öffentliche Ladepunkte höher (Puls, 2022). [↪ ZIFFER 117](#) Allerdings dominiert in der Studie auch hier das Laden im Depot (Speth und Plötz, 2024).
- 117.** Während für das Laden mit bis zu 500 Kilowatt (kW) Leistung mit dem Combined Charging System (CCS) ein bestehender internationaler Standard eingesetzt werden kann, bedarf es für die Szenarien mit höheren Ladeleistungen eines neuen Standards. Ein solcher befindet sich mit dem **Megawatt Charging System (MCS)** bereits im Standardisierungsprozess. Der finale IEC-Standard könnte noch dieses Jahres verabschiedet werden (Zeyen, 2024). Die Installation und der Betrieb erster Megawatt-Ladestationen für LKW im Pilotbetrieb ist gestartet. So konnten die LKW-Hersteller Daimler Truck und MAN im Frühjahr 2024 unabhängig voneinander jeweils einen Ladevorgang mit MCS demonstrieren und die erste Ladesäule für MCS-Laden in ihren Entwicklungszentren in Betrieb nehmen. Erst mit der Verfügbarkeit des MCS-Standards wird das erforderliche **volle Spektrum an Ladeszenarien für den batterieelektrischen Fernverkehr** zur Verfügung stehen, denn nur dieser Standard erlaubt ein Aufladen der Batterie innerhalb der gesetzlich vorgeschriebenen Fahrtunterbrechung von 45 Minuten, die nach einer Lenkdauer von viereinhalb Stunden vorgesehen ist (Art.7 EG

▸ ABBILDUNG 48

Ladeszenarien mit empfohlener Ladeleistung für BE-LKW



1 – Primär bei Tank- und Silofahrzeugen. 2 – Primär bei Stückgutfahrzeugen. 3 – Abhängig davon, ob parallel oder sequenziell geladen wird. 4 – In Verbindung mit Lastmanagement. 5 – Das Megawatt-Ladesystem (MCS), das sich derzeit noch im Standardisierungsprozess befindet, wird voraussichtlich Ladeleistungen von bis zu 3,75 MW ermöglichen. Allerdings dürfte eine Spitzenleistung von etwa 1 MW ausreichen, um den LKW innerhalb der gesetzlichen Pausenzeit vollständig aufzuladen.

Quellen: NPM (2021a), eigene Darstellung
© Sachverständigenrat | 24-073-01

561/2006). Der Bedarf an öffentlichen MCS-Ladepunkten für den Güterfernverkehr dürfte jedoch erst mit einer gewissen Verzögerung ansteigen, weil zunächst Fahrzeuge mit eher regionalen Einsatzprofilen und entsprechend kürzeren Reichweiten elektrifiziert werden dürften, ▽ ZIFFERN 108 FF. die fast ausschließlich im privaten Depot oder in Industriegebieten laden (Jöhrens et al., 2022; Speth und Plötz, 2024).

- 118. Herausforderungen** beim Aufbau einer öffentlichen Ladeinfrastruktur für BE-LKW ergeben sich aus dem erforderlichen **Anschluss der Ladepunkte an das Stromnetz**, ▽ KASTEN 16 der entsprechende Infrastrukturplanungen und Investitionen erforderlich macht. Je mehr Ladepunkte lokal geclustert sind und je schneller geladen wird, desto mehr Strom wird auf einmal an einem bestimmten Ort benötigt. Dafür wird oft eine Erweiterung oder Umrüstung des Verteilnetzes erforderlich. Die Bedingungen für den Netzanschluss werden dabei durch die lokalen Verteilnetzbetreiber bestimmt. Diese haben zwar gemäß § 17 EnWG (Energiewirtschaftsgesetz) eine Netzanschlusspflicht. Die Bereitstellung von Informationen über Anschlussmöglichkeiten ist jedoch häufig zeitaufwendig, da in der Hoch- und Mittelspannung für jeden Standort eine individuelle Prüfung und Berechnung durch den Netzbetreiber erforderlich ist.

↳ KASTEN 16

Fokus: Wechselwirkungen zwischen Stromsystem und Hochlauf der Elektromobilität

Für einen breiten Ausbau von Ladestationen wird eine deutliche Erhöhung der Stromerzeugung und der installierten Stromerzeugungskapazität benötigt. Zwischen der maximalen Stromerzeugungskapazität und der tatsächlichen Stromerzeugung liegt eine Lücke, die bei konventionellen Kraftwerken wesentlich von der Nachfrage determiniert wird. Da die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien von externen Faktoren abhängt, muss die Erzeugungskapazität deutlich ausgeweitet werden, um zu jedem Zeitpunkt die Nachfrage nach Strom bedienen zu können. Daher wird die **Lücke zwischen tatsächlicher Stromerzeugung und Stromerzeugungskapazität** mit zunehmendem Anteil erneuerbarer Energien an der Stromversorgung **zunehmen**. Eine Abschätzung des Sachverständigenrates ergibt, dass in einem Szenario, in dem der Straßengüterverkehr gänzlich durch BE-LKW abgedeckt würde, zusätzlich etwa 100 TWh Strom jährlich und, je nach Ladeverhalten, ca. 2,85 bis 10 Gigawatt (GW) Erzeugungskapazität benötigt werden dürften. [↳ ZIFFERN 187 FF. ANHANG](#) Je nachdem, wie stark der Straßengüterverkehr künftig wächst und welchen Marktanteil BE-LKW erreichen, müssen diese Werte nach oben oder unten korrigiert werden. Zum Vergleich lag der gesamte deutsche Stromverbrauch im Jahr 2023 bei 456,8 TWh (BNetzA, 2024b) und die gesamte installierte Erzeugungsleistung bei 232,7 GW (BNetzA, 2024c).

Der von der Bundesnetzagentur genehmigte Szenariorahmen 2023-2037/2045 (BNetzA, 2022b), der auf den Langfristszenarien 3 des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) basiert (Fraunhofer ISI et al., 2024), **sieht bis zum Jahr 2045 einen massiven Zuwachs des Strombedarfs vor**, mit einem Anstieg des jährlichen Netto- bzw. Bruttostromverbrauchs um bis zu 744 TWh (also 163 %) bzw. um bis zu 770 TWh (also 169 %). Dementsprechend ist eine große Expansion der Erzeugungskapazität geplant: bis zu 519 GW (232 %) sollen zugebaut werden. Zusätzlich werden bis zu 113,4 GW an neuen PV-Batteriespeichern und 54,5 GW an Großbatteriespeichern erwartet (BNetzA, 2022b). Um die Stromnetze auf die steigende Nachfrage durch die Elektromobilität vorzubereiten, muss zudem der Netzausbau auf der Verteilnetzebene vorausschauend getätigt werden. Die **Anpassung des § 14d EnWG** im Jahr 2023 **verpflichtet die Verteilnetzbetreiber, beim Netzausbau die voraussichtliche Stromnachfrage bis zum Jahr 2045 zu berücksichtigen**.

Im Verhältnis zum gesamten geplanten Umbau der Stromsysteme, der für das Erreichen von Klimaneutralität notwendig ist, **macht die Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs insgesamt damit nur einen kleinen Teil der erwarteten Bedarfe aus**. Den Berechnungen der hier dargestellten Analyse folgend könnte der Energiebedarf eines vollständig elektrifizierten Straßengüterverkehrs künftig etwa 8 % der jährlichen Stromerzeugung in Deutschland ausmachen. Andere Simulationen für Deutschland kommen zu ähnlichen Ergebnissen (Göckeler et al., 2023). Damit geht nicht zwangsläufig einher, dass die Spitzennachfrage um denselben Betrag steigen muss. Vielmehr lässt sich der Umfang des notwendigen Netzausbaus reduzieren, wenn optimiert geladen wird, abhängig von Anwendungsfällen und gesteuert durch passende regulatorische Bedingungen, beispielsweise durch Time-of-Use-Tarife (Bernard et al., 2022). [↳ ZIFFER 189 ANHANG](#) Logistikzentren sind zudem attraktive Standorte für Photovoltaik. Hier besteht einer Studie zufolge ein erhebliches Potenzial, den notwendigen Strombedarf teilweise selbst zu decken und dadurch die Stromkosten für batterieelektrische Nutzfahrzeuge zu senken (Biedenbach und Blume, 2023).

119. Auer et al. (2023) bewerten die Attraktivität von öffentlichen LKW-Parkflächen und ihre potenzielle Eignung für die LKW-Ladeinfrastruktur in Deutschland in einer umfassenden Studie. Die **Realisationsdauern und die notwendigen Investitionen** zum Anschluss von Ladepunkten an das Stromnetz **sind je nach**

erforderlichem Netzanschluss sehr unterschiedlich. Ab einer Gesamtleistung eines Standorts von 15 Megawatt (MW) dürfte in der Regel ein Anschluss an das Hochspannungsnetz erforderlich werden. Das dürfte mit Realisationsdauern von etwa 5 Jahren verbunden sein (Blume et al., 2023). Ist mit dem Anschluss an das Hochspannungsnetz die gleichzeitige Errichtung eines Umspannwerks erforderlich, so sind Realisationsdauern von bis zu zehn Jahren und Investitionskosten von bis zu 20 Mio Euro möglich. Bei privaten Depots ist ein Anschluss an das Mittelspannungsnetz in der Regel ausreichend, wodurch die Realisationszeit auf ein bis zwei Jahre und die Investitionskosten auf unter 100 000 Euro reduziert werden können (NLL, 2022a). Durch ein aktives Lademanagement, d. h. durch Aufteilung der maximalen Last, die an einem Ladepunkt gezogen werden kann, auf alle Fahrzeuge, die gleichzeitig laden, lassen sich die Netzanschlusskosten erheblich reduzieren (Burgess und Kippelt, 2021).

120. Da Ladevorgänge im Durchschnitt momentan deutlich länger dauern als Tankvorgänge und es daher künftig mehr Ladepunkte geben muss, als heute Zapfsäulen zur Verfügung stehen, um eine ähnliche Anzahl von Fahrzeugen mit Antriebsenergie zu versorgen, geht mit dem Hochlauf emissionsarmer Fahrzeuge ein **deutlich erhöhter Flächenbedarf für parkende und ladende Fahrzeuge** einher (Monopolkommission, 2023a). Insbesondere entlang der Autobahnen, wo ohnehin bereits zu wenig Stellplätze für LKW zur Verfügung stehen (BaST, 2019; BGL, 2019), könnte das zum Problem werden. Darüber hinaus dürfte für einen reibungslosen Ablauf in der Logistikbranche erforderlich sein, dass Reservierungsmöglichkeiten für öffentliche Ladeinfrastruktur geschaffen werden, damit Fahrten und Ankunftszeiten genau geplant werden können.
121. **Die EU-Verordnung zum Aufbau einer Infrastruktur für alternative Kraftstoffe (AFIR) gibt den Rahmen für den europaweiten Aufbau der Lade- und Tankinfrastruktur für emissionsarme LKW vor.** ↘ **KASTEN 18** Deutschland setzt die Anforderungen für den Aufbau der Ladeinfrastruktur im Rahmen des Masterplans Ladeinfrastruktur II (Bundesregierung, 2022b) um. Erste Zwischenziele müssen bereits bis Ende des Jahres 2025 erfüllt werden. ↘ **KASTEN 18** Vorgesehen ist der Aufbau eines ersten AFIR-konformen öffentlichen CCS- und MCS-Ladenetzes für BE-LKW entlang der Autobahnen (Initialnetz) auf Flächen des Bundes. Autohöfe und öffentlich zugängliche private Flächen werden nicht mit einbezogen. Im initialen LKW-Ladenetz sind insgesamt rund 4 000 Ladepunkte vorgesehen, davon 1 800 MCS-Ladepunkte.

Wie schon im Rahmen des sogenannten Deutschlandnetzes für PKW ist **geplant, über Ausschreibungen Aufträge zur Errichtung und zum Betrieb von Schnellladeinfrastruktur für LKW zu vergeben** und den Aufbau sowie Betrieb von Ladestationen an bewirtschafteten und unbewirtschafteten Raststätten durch öffentliche Mittel zu unterstützen. Die **Netzanschlüsse** sollen in einem **von der Vergabe unabhängigen Verfahren von der Autobahn GmbH** bestellt und **umgesetzt werden**. Diese bleiben somit Eigentum des Bundes. Die anfallenden Kosten sind im Klima- und Transformationsfonds (KTF) berücksichtigt. Es ist jedoch geplant, die Nutzung der Netzanschlüsse den Betreibern der Ladeinfrastruktur anteilig in Rechnung zu stellen. Der Autobauer Tesla und der Ladestationenbetreiber Fastned klagen seit zwei Jahren gegen die Autobahn GmbH,

weil diese mit dem Konzessionär fast aller Raststätten, dem Unternehmen Autobahn Tank & Rast Gruppe GmbH & Co. KG, einen Vertrag zum Aufbau der Ladeinfrastruktur ohne Ausschreibungsverfahren geschlossen hatte (Monopolkommission, 2023b; Tartler, 2023). Aufgrund dieses laufenden Verfahrens können im ersten Schritt lediglich unbewirtschaftete Rastanlagen in die Ausschreibungen einbezogen werden.

Obwohl die Ausschreibungen ursprünglich bereits Ende 2023 hätten beginnen sollen (Bundesregierung, 2022b), ist dieser Schritt nun **erst für das laufende Jahr 2024 geplant**. Details werden derzeit noch erarbeitet. Geplant ist aber offenbar, wie bei den Ausschreibungen des Deutschlandnetzes, mit den zukünftigen Betreibern Verträge zu schließen, die sicherstellen sollen, dass nach erfolgtem Zuschlag der Aufbau der Ladesäulen innerhalb eines vorgegebenen Zeitraums zu realisieren ist. Zudem sollen dem Ladesäulenbetreiber Vorgaben zu den technischen und baulichen Mindestanforderungen der zu errichtenden Ladesäulen sowie bezüglich der Preise für den Ladestrom gemacht werden.

122. Die AFIR erfordert auch den Aufbau eines **AFIR-konformen öffentlichen Initialnetzes für Wasserstofftankstellen bis zum Jahr 2030**. [↪ KASTEN 18](#) Hierfür kündigte die Bundesregierung die Entwicklung eines Masterplans für die Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie im Verkehr an (BMDV, 2023c). Konkrete Pläne stehen hierfür allerdings noch aus. Um AFIR-konform zu sein, müssen Wasserstofftankstellen die Betankung mit gasförmigem oder flüssigem Wasserstoff mit einem bestimmten Druckniveau ermöglichen. Nicht alle bislang in Deutschland existierenden Wasserstofftankstellen erfüllen diese Anforderungen. Die Förderung von Wasserstofftankstellen erfolgte bislang über Investitionszuschüsse. In den letzten Förderaufrufen des Bundes im Jahr 2023 war eine Förderquote in Höhe von bis zu 80 % der Investitionskosten möglich. Eine Prüfung, ob ein Anreiz zum Ausbau des Wasserstofftankstellennetzes mit einem ähnlichen Fördermechanismus wie der Ausschreibung, äquivalent zur Ladeinfrastruktur, möglich und zielführend ist, ist noch nicht abgeschlossen. Angesichts notwendiger Priorisierungen im KTF trifft das BMDV aktuell keine Aussage zu künftigen Fördermöglichkeiten im Bereich Wasserstoffbetankungsinfrastruktur.

[↪ KASTEN 17](#)

Hintergrund: Wasserstoff-Infrastruktur für Nutzfahrzeuge im Fernverkehr

Die derzeit **existierenden Wasserstofftankstellen** in Deutschland **sind mit FCE-LKW nur bedingt kompatibel**. Mögliche Transport- und Anlieferoptionen sowie notwendige Speicher- und Aufbereitungsanlagen an Wasserstofftankstellen hängen davon ab, in welcher Form Wasserstoff in schweren Nutzfahrzeugen künftig eingesetzt wird, worüber jedoch noch Unsicherheit besteht (Zerhusen et al., 2023). [↪ KASTEN 15](#) Sollte künftig gasförmiger Wasserstoff in FCE-LKW eingesetzt werden, müsste, um schwere FCE-LKW in ähnlicher Zeit wie Diesel-LKW betanken zu können, die Durchflussrate des Wasserstoffs von der Zapfsäule in das Fahrzeug erhöht werden (IEA, 2023a; Zerhusen et al., 2023). Findet hingegen in künftigen FCE-LKW flüssiger Wasserstoff Anwendung, was sich nach Angaben von Herstellern derzeit abzuzeichnen scheint, können die existierenden Tankstellen für gasförmigen Wasserstoff nicht für LKW genutzt oder ertüchtigt

werden. Daher wäre der Aufbau einer gänzlich neuen Versorgungsinfrastruktur notwendig.

Für die künftige **Versorgung von Tankstellen mit klimaneutralem Wasserstoff** existiert bislang noch **kein etabliertes Modell**. Wasserstoff kann in unterschiedlichen Aggregatzuständen an Tankstellen bereitgestellt werden. Heute ist die Anlieferung von gasförmigem Druckwasserstoff sowie von tiefkaltem Flüssigwasserstoff mittels LKW etabliert. Die Versorgung durch LKW ist jedoch nicht für höhere Abgabemengen geeignet, für die andere Versorgungswege erforderlich wären (NWR, 2023a; Zerhusen et al., 2023). Das Wasserstoff-Kernnetz bildet das Grundgerüst für den Aufbau der Wasserstoffinfrastruktur in Deutschland. Die Wasserstoffleitungen sollen bis zum Jahr 2032 sukzessive in Betrieb gehen (BMWK, 2023a). Technisch wäre eine **Bereitstellung von Wasserstoff als Kraftstoff über das Wasserstoff-Kernnetz möglich**, wobei dieses nicht direkt kompatibel mit der Infrastruktur von Tankstellen sein wird, weil dort andere Druckniveaus herrschen. Es müssten daher Verdichter an den Zapfsäulen eingesetzt werden, die zusätzliche Energie brauchen. Zudem wäre der **Aufbau einer regionalen Verteilinfrastruktur von der Pipeline des Kernnetzes zur Tankstelle notwendig**. Der Bau solcher Anschlussleitungen ist mit hohen Investitionskosten und großem Planungsaufwand verbunden (Zerhusen et al., 2023). Alternativ könnte eine Vor-Ort-Erzeugung von Wasserstoff mittels Elektrolyseur direkt an der Tankstelle erfolgen (NWR, 2023b; Zerhusen et al., 2023). Um eine entsprechende Erzeugungskapazität an den Tankstellen zu sichern, wäre jedoch ein erheblicher Flächen- und Strombedarf der Gesamtanlage und ein entsprechend dimensionierter Netzanschluss nötig (Zerhusen et al., 2023), der wiederum hohe Investitionen und einen zeitlichen Vorlauf erfordert.

↳ ZIFFER 119

123. Im vergangenen Jahr hat die **europaweit erste automatische Batteriewechselstation für BE-LKW in Deutschland den Testbetrieb** eröffnet. Darin wird durch einen Roboter eine leere Batterie gegen eine volle Batterie ausgetauscht. Der ganze Vorgang dauert etwa zehn Minuten – also so lange, wie das Betanken eines Diesel-LKW. Verschiedene Studien betrachten diese Technologie als vielversprechende Ergänzung zum Aufbau einer flächendeckenden Ladeinfrastruktur, weil lange Ladepausen vermieden werden können und die Notwendigkeit zum Aufbau von Netzkapazitäten entfällt (Vallera et al., 2021; Zhu et al., 2023). Allerdings müssten in den Stationen Batterien vorgehalten werden, die im laufenden Transformationsprozess noch viele Jahre ein knappes Gut bleiben dürften. In Asien, insbesondere in China, sind Batteriewechselstationen für PKW und LKW weit verbreitet (IEA, 2023a). Fast alle großen chinesischen LKW-Hersteller haben inzwischen ein batteriewechselfähiges Modell ihrer BE-LKW auf den Markt gebracht. Die Gesamtzahl der Batteriewechselstationen in China lag Ende des Jahres 2022 bei fast 2 000 und damit 50 % höher als Ende 2021 (IEA, 2023a).
124. Weil der Güterverkehr in Europa grenzüberschreitend stattfindet, muss die jeweils **notwendige Versorgungsinfrastruktur europaweit vorhanden sein**. Die meisten europäischen Länder haben damit begonnen, eine Ladeinfrastruktur für BE-LKW aufzubauen. Dabei schreiten vor allem Schweden und die Niederlande voran (Mulholland und Egerstrom, 2024). Oberleitungen spielen hingegen in anderen europäischen Ländern kaum (mehr) eine Rolle. Wasserstoff-tankstellen für PKW werden in mehreren Ländern zurückgebaut, weil sie unter anderem den aktuellen Standards nicht entsprechen (Everfuel, 2023; Automobil-

woche, 2024; FR, 2024). Deutschland verfügt heute über die meisten Wasserstofftankstellen Europas. Allerdings wurden auch hierzulande zuletzt Wasserstofftankstellen geschlossen (Nicoley, 2024).

▸ KASTEN 18

Hintergrund: Europäische Anforderungen an den Aufbau der Versorgungsinfrastruktur für alternative Kraftstoffe

Das **Europäische Parlament** hat im Jahr 2023 eine ergänzende **Verordnung zum Aufbau einer Infrastruktur für alternative Kraftstoffe (AFIR)** erlassen (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union, 2023). Die AFIR gibt europaweit Anforderungen für den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe vor und strebt eine Vereinheitlichung sowie Interoperabilität der Lade- und Bezahlschnittstellen an. Sie legt unter anderem Mindestanforderungen für den Aufbau einer batterieelektrisch- und wasserstoffbasierten Lade- und Tankinfrastruktur entlang des transeuropäischen Verkehrsnetzes (TEN-V) bis zum Jahr 2030 fest (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union, 2023). Für schwere Nutzfahrzeuge soll entlang des TEN-V-Kernetzes (in Deutschland 6 369 km) alle 60 km in jeder Richtung ein Ladestandort mit mindestens 3,6 MW aggregierter Ladekapazität und alle 200 km eine Wasserstofftankstelle errichtet werden. [▸ ABBILDUNG 54 ANHANG](#) Entlang des TEN-V-Gesamtnetzes (in Deutschland weitere 5 027 km) soll in jeder Fahrtrichtung alle 100 km ein Ladestandort mit mindestens 1,5 MW aggregierter Ladeleistung errichtet werden (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union, 2023). Bis Ende des Jahres 2025 (2027) sollen bereits 15 % (25 %) der Ladestandorte entlang des TEN-V-Kernetzes in Betrieb genommen sein. Insgesamt sollen durch AFIR bis zum Jahr 2030 europaweit rund 2 800 Ladestationen mit einer Gesamtladeleistung von 7,5 GW installiert werden (Plötz et al., 2024).

Da die AFIR lediglich eine Gesamtkapazität je Ladestandort vorschreibt, lassen sich die Anforderungen auch durch den Aufbau von CCS-Ladestationen erfüllen und erfordern nicht zwangsläufig eine Megawattladeinfrastruktur. Eine europaweite Evaluation der AFIR kommt zu dem Schluss, dass deren Anforderungen kurzfristig zu hoch (etwa 25 % mehr Lademöglichkeiten als der in der Studie prognostizierte Bedarf) und längerfristig zu niedrig (80 % mehr Ladekapazität im Jahr 2030 nötig) sein könnten (Ragon et al., 2022). Für Deutschland berechnen Balke et al. (2024b), dass erst ein öffentliches Ladenetz entlang der Hauptverkehrsrouten mit Abständen von 60 km und einer Ladeleistung von 1,7 MW je Ladepunkt dafür sorgen würde, dass der Güterfernverkehr in Deutschland mit hoher Sicherheit ohne Zeitverlust und mit geringen Batteriekapazitäten betrieben werden kann. Bei einer stärkeren Anpassung der Tourenplanung kann auch eine Ladeleistung von 1 MW je Ladepunkt mit Abständen von 100 km ausreichend sein. Eine strategische Platzierung von Ladestationen über Deutschland hinweg kann die Gesamtzahl der notwendigen Standorte deutlich reduzieren und 93,8 % des inländischen Langstreckenverkehrs in Deutschland abdecken (Balke et al., 2024a). [▸ ABBILDUNG 54 ANHANG](#) Die AFIR dürfte daher insgesamt mit Blick auf die **Netzwerkdichte für Deutschland prinzipiell ausreichend** sein, die in der Verordnung **vorgesehene Mindestladeleistung** liegt jedoch **am absoluten Minimum**.

IV. MASSNAHMEN: REFORMOPTIONEN FÜR DEN GÜTERVERKEHR DER ZUKUNFT

125. Angesichts der beiden Herausforderungen des Güterverkehrs, des Zustands der Infrastruktur und der Notwendigkeit einer beschleunigten Dekarbonisierung, besteht politischer Handlungsbedarf. **Monetäre und nicht-monetäre Hemmnisse schränken die Investitionen in die Verkehrsinfrastruktur ein.** ↘ ZIFFERN 126 FF. Um im künftigen Verkehrssystem eine möglichst leistungsfähige Infrastruktur bereitzustellen, muss deren Finanzierung gesichert ↘ ZIFFER 127 und die Planungs- und Genehmigungsverfahren müssen vereinfacht und beschleunigt werden. ↘ ZIFFER 129 Damit der Schienengüterverkehr gestärkt wird, gilt es, **Verlagerungspotenziale bestmöglich zu nutzen.** Dazu müssen die Kapazitäten der Schiene ausgebaut und effizienter genutzt werden. Für die Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs muss vor allem der **Aufbau einer Energieinfrastruktur für alternative Antriebe** vorangetrieben werden. Die öffentliche Hand sollte dafür Flächen entlang der Autobahnen für den Aufbau der Lade- und Tankinfrastruktur unbürokratisch bereitstellen und mögliche Hemmnisse für die Bereitstellung privater Flächen reduzieren. ↘ ZIFFER 144 Die Politik sollte darüber hinaus durch technologische Richtungsentscheidungen die Unsicherheit für private Akteure über die künftigen Rahmenbedingungen reduzieren und so den Markthochlauf von BE-LKW beschleunigen. ↘ ZIFFER 159

1. Hemmnisse bei der Modernisierung der Infrastruktur abbauen

126. Der sinkende Modernitätsgrad ↘ ABBILDUNG 38 RECHTS sowie die sich verschlechternden Zustandsnoten ↘ KASTEN 11 legen nahe, dass **mehr finanzielle Mittel für die Verkehrsinfrastruktur in Deutschland bereitgestellt werden sollten.** Verlässliche Schätzungen zur Höhe der Ausgaben, die für eine zukunftsfähige Verkehrsinfrastruktur erforderlich wären, liegen jedoch nicht vor. ↘ PLUSTEXT 4 Zwar legt der Bundesverkehrswegeplan 2030 (BVWP) für die mittlere Frist fest, in welchen Bereichen der Verkehrsinfrastruktur in den kommenden Jahren Bedarfe bei Ersatz und Erhalt sowie Aus- und Neubau bestehen. ↘ PLUSTEXT 2 Der tatsächliche Finanzbedarf kann darüber jedoch nur unzureichend abgeschätzt werden. Die Priorisierung der Projekte anhand der Nutzen-Kosten-Analyse setzt einen Anreiz, die tatsächlichen Kosten eher zu unterschätzen (Böttger, 2023). ↘ PLUSTEXT 2 Auch starke Preissteigerungen, wie sie seit dem Jahr 2019 eingetreten sind, können lediglich zeitversetzt berücksichtigt werden. ↘ PLUSTEXT 2 Dies kann zu Verzögerungen beitragen und schafft Unsicherheit (Handelsblatt, 2024a). Auch sind die Kostenangaben für Aus- und Neubauprojekte mangels einheitlicher Vorgaben zur Kostenermittlung zwischen den Projekten nicht vergleichbar (Bundesrechnungshof, 2016).



➤ PLUSTEXT 4

Hintergrund: Bestimmung der erforderlichen Ausgaben für die Verkehrsinfrastruktur

In Deutschland wird zur **Bestimmung der erforderlichen Ausgaben für die Verkehrsinfrastruktur**, insbesondere auf kommunaler Ebene, **häufig auf Befragungen zurückgegriffen** (Arndt und Schneider, 2023; Raffer und Scheller, 2023). Die **Aussagekraft dieser Umfragen** kann jedoch durch Selektionseffekte, strategisches Antwortverhalten oder mangelnde Abgrenzung des Investitionsrückstands **beeinträchtigt sein** (Christofzik et al., 2019; Gornig, 2019). Um die benötigten Mittel zu bestimmen, kann **alternativ ermittelt werden, wie teuer es wäre, das bestehende Anlagevermögen in seinen Ursprungszustand zu bringen**. Für Deutschland wurde für den Zeitraum von 2006 bis 2011 auf diese Weise ein Ausgabedefizit von 3,8 Mrd Euro pro Jahr festgestellt, der größte Anteil davon bei den Wasserwegen und der Schiene (Kunert und Link, 2013). Künftige Nachfrageveränderungen aufgrund der wirtschaftlichen oder demografischen Entwicklung und neue Bedarfe, z. B. aufgrund der angestrebten Dekarbonisierung, bleiben hier jedoch unberücksichtigt. Dieser Nachteil könnte über Schätzungen der Nachfrage nach Verkehrsinfrastruktur adressiert werden (Fay, 2001; Fay und Yepes, 2003; Ruiz-Nuñez und Wei, 2015; Branchoux et al., 2018). Der BVWP kann dies nur bedingt leisten, da für den Erhalt und Ersatz lediglich die zurückliegende Verkehrsentwicklung berücksichtigt wird. Sich verändernde Verkehrsströme, wie sie beispielsweise im Zuge der strukturellen Veränderungen durch die Dekarbonisierung des Güterverkehrs auftreten können, finden also keine Berücksichtigung. ➤ PLUSTEXT 2

127. Im Jahr 2023 wurden rund 22,4 % der Verkehrsausgaben durch die LKW-Maut und der Rest über das Steueraufkommen, im Wesentlichen aus der Energiesteuer, finanziert (Bundesregierung, 2023c; BMF, 2024). Mit dem Umstieg auf alternative Antriebe dürften diese Steuereinnahmen stark sinken (UBA, 2021; Wissenschaftlicher Beirat beim BMDV, 2022; JG 2020 Ziffer 386). Eine stärkere Nutzerfinanzierung kann dazu beitragen, den Wegfall der Steuereinnahmen zu kompensieren. Um sicherzustellen, dass die Entgelte zur Nutzung der Infrastruktur tatsächlich zu deren Erhaltung und Ausbau eingesetzt werden, ist die **Zweckbindung der systeminhärenten Finanzierungsquellen**, wie sie bei den Maut-einnahmen besteht (BFStrMG § 11 Abs. 3), **wichtig**. Die LKW-Maut könnte im Zeitraum von 2024 bis zum Jahr 2027 etwa 42 % der geplanten Verkehrsausgaben des Bundes decken (BMDV, 2023d; Bundesregierung, 2023c, S. 65). Konsequenterweise sollten künftig neben LKW auch PKW für die Nutzerfinanzierung der Infrastruktur herangezogen werden. Dies könnte über eine fahrleistungsabhängige PKW-Maut geschehen. Da schwere Fahrzeuge die Infrastruktur stärker abnutzen als leichte Fahrzeuge, wäre eine Differenzierung nach Gewicht sinnvoll (Agora Verkehrswende, 2022).
128. Der Sachverständigenrat hat einen Vorschlag erarbeitet, wie der **Verschuldungsspielraum durch eine Reform der Schuldenbremse erhöht** werden kann, ohne dass die Tragfähigkeit der Staatsfinanzen gefährdet wird (SVR Wirtschaft, 2024). Mit einer solchen Reform könnte je nach Entwicklung der Schuldenstandsquote bis zum Jahr 2027 der strukturelle Verschuldungsspielraum kumuliert um 21,6 Mrd bis 57,5 Mrd Euro steigen. Dieser sollte für zukunftsgerichtete Investitionen genutzt werden. Investitionen in die Infrastruktur,

von denen künftige Generationen profitieren, die diese auch nutzen, stellen eine Investition in diesem Sinne und damit einen bestmöglichen Gebrauch erweiterter Verschuldungsspielräume dar.

129. Entscheidend ist jedoch vor allem, dafür zu sorgen, dass die notwendigen öffentlichen Infrastrukturinvestitionen nicht länger die Residualgröße der Haushaltspolitik sind. Nach Vorschlag des wissenschaftlichen Beirats beim BMWi (2020) könnten Bund und Länder dazu **Investitionsfördergesellschaften** (IFGs) einrichten, deren Finanzierung aus den Kernhaushalten langfristig garantiert wird. Dies könnte z. B. durch bindende vertragliche oder gesetzliche Ansprüche auf gleichbleibende Mittelzuweisungen über einen Zeitraum von fünf oder mehr Jahren erfolgen, sodass den Auftraggebenden und Auftragnehmenden Planungssicherheit gewährt werden kann. Die Errichtung von Investitionsfördergesellschaften könnte mittelfristig auch dazu **beitragen, Planungs- und Verwaltungshemmnisse auf kommunaler Ebene zu überwinden** (Wissenschaftlicher Beirat beim BMWi, 2020). So könnten zentrale Planungskompetenzen und Personal auf Ebene mehrerer Länder oder Kommunen gebündelt werden. Hierdurch ließen sich Synergieeffekte und Kostenvorteile erzielen. Beispiele für solche Gesellschaften sind die Autobahn GmbH zur Verwaltung des deutschen Bundesfernstraßennetzes und die im Rahmen der Deutschen Einheit zum Aufbau der Infrastruktur in Ostdeutschland gegründete DEGES GmbH.
130. Umfangreiche nachbar- und wettbewerbsrechtliche Vorschriften eröffnen Spielraum für Klagen und führen zu erheblichen Verzögerungen und Kostensteigerungen bei Infrastrukturprojekten (BMVI, 2015b; Wissenschaftlicher Beirat beim BMWi, 2020). Die Durchsetzung des Baurechts von bedeutenden Infrastrukturprojekten per Gesetz wie in Dänemark (Roland Berger, 2013, S. 76 ff.; IHK Nord, 2017) kann ein Weg sein, um wichtige Teile der Infrastruktur zügiger zu modernisieren. Ein Weg in die richtige Richtung ist das „**Gesetz zur Beschleunigung von Genehmigungsverfahren im Verkehrsbereich**“. Für ausgewählte Projekte im Bereich Schiene und Straße wurde ein überragendes öffentliches Interesse festgelegt und dadurch deren Planungsverfahren beschleunigt. Sinnvoll ist auch der im Gesetz beschlossene Wegfall der Genehmigungspflicht und Umweltverträglichkeitsprüfungen bei der Sanierung von Brücken.

Vergabeverfahren in Deutschland **folgen dem möglichst rechtssicheren Weg**, das macht sie jedoch langsam und kostspielig. Ansatzpunkte für Reformen ergeben sich bei einer Abkehr von der starken Preisfokussierung und einem stärkeren Einbezug von qualitativen Wertungskriterien im Rahmen von funktionalen Ausschreibungen, sowie beim sogenannten Mittelstandsgebot, das zu einer ineffizient kleinen Losbildung zwingen kann (BMVI, 2015b; Wissenschaftlicher Beirat beim BMWi, 2020).

2. Schienengüterverkehr stärken

131. Die **Potenziale zur Verlagerung** des Güterverkehrs von der Straße auf die Schiene sind mittelfristig begrenzt. ↘ **ZIFFERN 98 FF.** Eine zentrale Voraussetzung, um diese zu erhöhen, wäre eine erhebliche Effizienz- und Kapazitätssteigerung im

Schienenverkehr. ↘ ZIFFER 132 Erst bei entsprechend verfügbaren Kapazitäten ist eine Steigerung der preislichen Wettbewerbsfähigkeit, beispielsweise durch eine Senkung von Steuern und Umlagen auf Fahrstrom im Schienenverkehr, erfolgversprechend. ↘ ZIFFER 90 Dort wo die Schiene bereits heute Effizienzvorteile gegenüber der Straße bietet, insbesondere **auf langen, internationalen Strecken**, ↘ ZIFFER 94 sollten die Voraussetzungen für eine intermodale Verlagerung zusätzlich gestärkt werden. ↘ ZIFFER 198 ANHANG

Effizienz und Kapazität im Schienengüterverkehr steigern

132. Die Wahl des Transportmittels für kleinere Ladungsgrößen hängt vor allem von der Transportzeit ab. ↘ ZIFFER 93 Hier spielt auch die **Beladungszeit bzw. die Zeit der Zugzusammenstellung** eine **entscheidende Rolle**. Insbesondere im Einzelwagenverkehr werden Züge aus kleineren Zugteilen zusammengestellt. In vielen Fällen passiert dies noch durch Kuppeln per Hand, was Personal erfordert und verhältnismäßig langsam ist (Bundesregierung, 2019b). Eine **entscheidende Verbesserung könnte die europaweite Einführung der Digitalen Automatischen Kupplung (DAK) sein** (BMDV, 2021a). Sie erfordert aber Investitionen in diese Technologie. Bei etwa 54 000 bislang händisch durchgeführten Kuppelvorgängen pro Tag allein in Deutschland ließe sich durch eine automatisierte Kupplung eine erhebliche Zeitersparnis realisieren (DB Cargo, 2024c). Erste koordinierte Erprobungen haben jedoch gezeigt, dass noch weiterer Optimierungsbedarf des DAK-Systems besteht, bevor es flächendeckend eingeführt werden kann; erste Einsätze sind jedoch für das laufende Jahr geplant (DB, 2024c, 2024d). Sobald diese Kundeneinsätze die Serienreife der Technologie gezeigt haben, sollten möglichst große Flottenteile zügig mit der Technologie ausgestattet werden.
133. Die **Kapazität des vorhandenen Schienennetzes** kann **durch die Auslastung einzelner Strukturelemente** wie Gleisabschnitte, Brücken oder Bahnhöfe **beschränkt** sein (Meirich, 2017). Durch eine **effizientere Trassenplanung**, z. B. in der Disposition, ↘ ZIFFERN 98 UND 100 kann die Kapazität erhöht werden (Meirich, 2017). Da die Streckenbelastung regional höchst unterschiedlich ist (DB, 2023a), könnte eine Umleitung des Schienengüterfernverkehrs auf weniger stark ausgelastete Strecken Kapazitäten freisetzen und somit zu einer Kapazitätsausweitung beitragen. Allerdings könnte dies für den langsameren Schienengüterverkehr teils erheblich längere Strecken bedeuten, die unter Berücksichtigung bestehender arbeitsrechtlicher Regelungen, z. B. zur täglichen Rückkehr zum Heimatbahnhof, nicht umsetzbar sein könnten, sowie aufgrund von höherem Verschleiß der Güterzüge zu höheren Transportkosten führen. Zukünftig können sowohl bei der Trassenplanung als auch bei der Disposition nach Störungen KI-Systeme die Effizienz erhöhen. ↘ ZIFFER 195 ANHANG
134. Für eine Kapazitätserweiterung im gemischten Betrieb des Schienennetzes ist es notwendig, **ausreichend Überholgleise vorzuhalten**, um schnelleren Zügen die Möglichkeit zu geben, langsamere Verkehre zu überholen (Muthmann, 2004). Allerdings hat die DB AG das Netz über viele Jahre eher rück- als ausgebaut. Vor allem Überholgleise sind den ausbleibenden Investitionen zum Opfer gefallen

(VCD, 2022). Diesem Mangel soll mit dem Bundesverkehrswegeplan 2030 Abhilfe geschaffen werden, in dem unter anderem der **Ausbau des sogenannten 740m-Netzes**, ein Netz an Überholgleisen für bis zu 740 Meter lange Züge, angelegt ist (BVWP, 2018). Damit kann zukünftig die Kapazität im Schienengüterverkehr erhöht werden. Nach erfolgtem Ausbau wird es so **möglich, längere Güterzüge einzusetzen** und in schnellerem Tempo zu bewegen (DB, 2023c).

Weitere, allerdings voraussichtlich **erst in der langen Frist umsetzbare Strategien**, die die Kapazität des Schienensystems erhöhen könnten, umfassen **Digitalisierungen** von Signal- und Leitsystemen, **autonom fahrende (Güter-)Züge** und die Belegung von Schnellfahrstrecken mit Güterzügen, für welche diese allerdings technisch aufgerüstet werden müssen. [↘ ZIFFERN 195 FF. ANHANG](#)

Wettbewerbsfähigkeit des Schienengüterverkehrs erhöhen

- 135.** Auf europäischer Ebene laufen zahlreiche Initiativen zur Schaffung eines einheitlichen europäischen Eisenbahnraums. [↘ ZIFFER 184 ANHANG](#) Insbesondere auf langen Strecken ist der Schienengüterverkehr prinzipiell rentabel und weitere Potenziale sollten erschlossen werden. Beim **Ausbau der europäischen Schienengüterverkehrs-Korridore** kommt Deutschland aufgrund seiner zentralen Lage eine Schlüsselrolle zu. Die Verfahren zur Genehmigung von Neu- und Ausbaustrecken **sollten beschleunigt werden**. Ebenso sollten Inkompatibilitäten im internationalen Schienengüterverkehr, die durch nationale Regulierungen und Normen bedingt sind, weiter reduziert werden. Hierzu könnte beispielsweise die Einführung einer gemeinsamen europäischen Betriebsprache beitragen. Darüber hinaus sollten auch technische Inkompatibilitäten wie unterschiedliche Gleisspurweiten mittelfristig vereinheitlicht werden.
- 136.** Das Bundesschienenwegeausbaugesetz (BSWAG) setzt **Fehlanreize bei der Durchführung von Instandhaltungsmaßnahmen in der Schieneninfrastruktur**. [↘ KASTEN 14](#) Der Bund ist in der derzeitigen Ausgestaltung verpflichtet, Ersatzinvestitionen zu finanzieren, während die DB AG lediglich für Instandhaltungsmaßnahmen aufkommen muss. Das führt dazu, dass notwendige und ökonomisch effiziente Instandhaltungen verzögert werden und schlimmstenfalls gänzlich ausbleiben, bis die Substanz nur noch einen vollständigen Ersatz erlaubt. In einer im Vermittlungsausschuss befindlichen **Überarbeitung des BSWAG** ist angelegt, dass auch der Bund für Instandhaltungsausgaben aufkommen darf. Dies würde die **Anreizproblematik nur in Teilen und zu Lasten des Bundes ausräumen**.

Darüber hinaus sollte die Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung (**LuFV**) **grundlegend überarbeitet** werden. Ob die DB AG die bereitgestellten Bundeszuschüsse für Ersatzinvestitionen adäquat einsetzt und ob sie ihrer Instandhaltungsverpflichtung in ausreichendem Maße nachkommt, kann durch die Qualitätskennzahlen nur unzureichend überprüft werden. Hierzu ist eine Überarbeitung und Erweiterung dieser Kennzahlen notwendig (Monopolkommission, 2023a). Der Sachverständigenrat sieht in der Behebung dieser Anreizprobleme einen wichtigen Hebel zur langfristigen nachhaltigen Verbesserung der Schieneninfrastruktur.

137. Eine **eigentumsrechtliche Entflechtung der Infrastrukturgesellschaft vom übrigen DB-Konzern** könnte dazu beitragen, die Qualität der Schieneninfrastruktur zu erhöhen. Zum einen könnte die Transparenz über die Verwendung staatlicher Investitionskostenzuschüsse für Infrastrukturinvestitionen in die Schiene verbessert werden. [↪ KASTEN 14](#) Zum anderen könnte eine von Konzerninteressen geleitete ineffiziente Priorisierung von Investitionen verhindert werden. Diese können entstehen, wenn sich Investitionen an den Zielen der bahn-eigenen Verkehrsunternehmen und nicht an den Zielen des gesamten Schienennetzes orientieren (Monopolkommission, 2015a). Zudem könnte sich ein wirksamer Wettbewerb zwischen den Verkehrsunternehmen entwickeln. [↪ KASTEN 14](#) Als vertikal integrierter Konzern [↪ GLOSSAR](#) ist es im Interesse der DB AG, ihren Gesamtgewinn zu maximieren. **Konzernunternehmen könnten deshalb trotz regulatorischer Vorkehrungen Vorteile gegenüber Wettbewerbern eingeräumt werden**, beispielsweise beim **Zugang zur Schieneninfrastruktur** (Monopolkommission, 2023a). Ein starker Wettbewerb führt zu Kostensenkungen, Innovationen und höherer Qualität. Dadurch könnte die Attraktivität des Schienengüterverkehrs in Deutschland gesteigert werden (Monopolkommission, 2015a, 2023a). Inwieweit die im Januar 2024 gegründete gemeinwohlorientierte Infrastrukturgesellschaft DB InfraGo diesen Zielen näher kommt, ist derzeit noch schwer zu beurteilen. [↪ KASTEN 14](#)

Mit einer eigentumsrechtlichen Trennung gehen jedoch auch **Übergangskosten** durch die Schaffung von Doppelstrukturen einher. Positive **Verbundvorteile könnten verloren gehen**. Verschiedene empirische **Studien** untersuchten die Effekte einer vertikalen Trennung auf die Kosten, **kommen jedoch zu gemischten Ergebnissen**. So finden beispielsweise Cantos et al. (2010) überwiegend positive Effekte. Mizutani et al. (2015) legen hingegen nahe, dass die Eisenbahnstruktur in Abhängigkeit von den länderspezifischen Gegebenheiten gewählt werden sollte, da sie stark von der Verkehrsintensität abhängt. Aufgrund der oben beschriebenen Effizienz- und Wettbewerbsvorteile überwiegen jedoch in der Gesamtschätzung die positiven Effekte einer eigentumsrechtlichen Trennung.

138. Um Anreize zur Qualitätsverbesserung für die Betreiber der Schieneninfrastruktur zu schaffen, könnte eine **qualitätsabhängige Komponente in das Trassenpreissystem** aufgenommen werden (Monopolkommission, 2023a). So könnte den Betreibern der Schienenwege bei Erfüllung von vordefinierten Qualitätszielen ein höherer Preissetzungsspielraum zugestanden werden. Bei Nichterfüllen der Ziele müssten entsprechende Abschläge hingenommen werden. Als Qualitätsparameter könnten beispielsweise Zuverlässigkeit, Schienennetzgröße, Substanzqualität, Kapazitätseinschränkungen und Servicequalität geeignet sein (Monopolkommission, 2023a).
139. Zur Stärkung der preislichen Wettbewerbsfähigkeit der Schiene bestehen Entlastungspotenziale bei der Stromsteuer und den weiteren Umlagen auf den Fahrstrom. [↪ ZIFFER 90](#) Die **Stromsteuer für Fahrstrom im Schienenverkehr** ist in **Deutschland** nach Angaben der Europäischen Kommission mit 1,14 Cent pro kWh deutlich **höher als in anderen europäischen Ländern**. Einige EU-Länder wie Belgien und Schweden erheben gar keine Steuern. Dies ist möglich, da auf europäischer Ebene für Fahrstrom kein Mindeststeuersatz festgelegt ist (EU

Richtlinie 2003/96/, Artikel 15). Um die preisliche Wettbewerbsfähigkeit des Schienengüterverkehrs zu stärken, könnte die Stromsteuer auf Null oder den für energieintensive Unternehmen geltenden Satz von 0,05 Cent pro kWh gesenkt werden.

3. Energieinfrastruktur für alternative Antriebe aufbauen

140. **Beim Aufbau einer flächendeckenden Lade- und Tankinfrastruktur für LKW** mit alternativen Antrieben kann aufgrund der notwendigen Koordination eine, möglicherweise auch finanzielle, öffentliche Unterstützung angezeigt sein (JG 2020 Ziffern 454 ff.). Dadurch könnte ein zügiger Aufbau der Ladepunkte gesichert bzw. eine anfängliche Unterauslastung überbrückt werden (Monopolkommission, 2023b). In den vergangenen fünf Jahren wurden die Investitionskostenzuschüsse für Aufbau- und Netzanschlusskosten öffentlich zugänglicher Lade- und Tankinfrastruktur allerdings nie vollständig abgerufen (Deutscher Bundestag, 2023c). Zudem wurden nur noch etwa ein Viertel der zugebauten Ladesäulen finanziell gefördert (NLL, 2022b; Monopolkommission, 2023b). Dies deutet darauf hin, dass für den **Hochlauf der Lade- und Tankinfrastruktur vor allem nicht-monetäre Hemmnisse** bestehen. [↪ ZIFFERN 116 UND 118](#)

Aufgrund der zeitnah zu erwartenden Wirtschaftlichkeit von BE-LKW [↪ ZIFFERN 108 FF.](#) besteht kein Grund anzunehmen, dass dies beim Aufbau der Ladeinfrastruktur für LKW grundsätzlich anders sein sollte, zumal CCS-Ladestationen auch durch BE-PKW genutzt werden können. **Für den Hochlauf einer MCS-Ladeinfrastruktur** entlang der Autobahnen, die nur durch den schweren Güterfernverkehr genutzt wird, sowie für **Ladestationen im privaten Depot**, die für die Elektrifizierung des Nah- und Verteilverkehrs eine wichtige Voraussetzung sind, **kann eine öffentliche Förderung jedoch sinnvoll sein, um den Markthochlauf zu beschleunigen**. Sie sollte dann aber auf die Phase des Markthochlaufs beschränkt werden.



[↪ PLUSTEXT 5](#)

Hintergrund: Staatliche Förderung für emissionsarme Nutzfahrzeuge

Die **Richtlinie zur Förderung von Nutzfahrzeugen mit alternativen, klimaschonenden Antrieben und dazugehöriger Lade- und Tankinfrastruktur (KsNI)** förderte bislang die Anschaffung von emissionsfreien Nutzfahrzeugen mit bis zu 80 % der Mehrkosten gegenüber Diesel-LKW (BMVI, 2021). **Zudem wurde auch die Beschaffung von betriebsnotwendiger Lade- und Tankinfrastruktur bezuschusst**. Damit hatte Deutschland die großzügigste öffentliche Förderung für den Kauf von emissionsarmen LKW in Europa (IEA, 2023a). Im anlässlich des Bundesverfassungsgerichtsurteils vom 15.11.2023 **neu aufgestellten Klima- und Transformationsfonds (KTF)** sind für das Programm jedoch **keine Mittel mehr vorgesehen** (Bundesregierung, 2023d). Derzeit sieht der KTF insgesamt **noch 1,9 Mrd Euro zur Förderung der öffentlichen Lade- und Tankinfrastruktur** für den Personen- und Nutzfahrzeugverkehr vor (gekürzt um 0,29 Mrd Euro) (BMWK, 2023b). Diese Mittel werden vor allem in den Aufbau des initialen Lade- und Tankstellennetzes für PKW und LKW entlang der Autobahnen fließen.

141. Mit dem Ende der Bundesförderung KsNI läuft die **Kaufförderung für emissionsarme Nutzfahrzeuge aus**. [↘ PLUSTEXT 5](#) Bei der Kaufentscheidung sind nicht allein der Anschaffungspreis, sondern die Gesamtbetriebskosten über den Lebenszyklus entscheidend. [↘ PLUSTEXT 3](#) Insbesondere im Güterfernverkehr entscheiden vor allem niedrige Energie- bzw. Kraftstoffkosten sowie die Verfügbarkeit der Lade- bzw. Tankinfrastruktur über die Wettbewerbsfähigkeit einer Technologieoption (Plötz et al., 2018). Die Wettbewerbsfähigkeit mit dem Diesel-LKW dürfte im Güternah- und Teilen des Regionalverkehrs bereits gegeben sein und sich von dort aus auf weitere Anwendungsfälle ausweiten (NPM, 2020; Basma et al., 2021; Jöhrens et al., 2022; Tol et al., 2022). [↘ ZIFFERN 108 FF.](#) Für die Kaufförderung von PKW zeigen verschiedene Studien hohe Mitnahmeeffekte (Muehlegger und Rapson, 2019; Xing et al., 2021; Qorbani et al., 2024). Das Auslaufen der Kaufförderung ist deshalb zu begrüßen. Öffentliche Mittel sind besser für den Aufbau der Ladeinfrastruktur für alternative Antriebe eingesetzt (Springel, 2021).
142. **Im Zuge der Neuauflistung des KTF** sind auch die **öffentlichen Mittel**, die **in den Aufbau der Lade- und Tankinfrastruktur** fließen, **gekürzt** worden. [↘ PLUSTEXT 5](#) Künftig werden diese vor allem für den Aufbau eines initialen Lade- und Tankstellennetzes entlang der Autobahnen eingesetzt. [↘ ZIFFER 121](#) **Auch außerhalb des Initialnetzes** wird eine **Ladeinfrastruktur für BE-LKW benötigt**, insbesondere auf Autohöfen, öffentlich zugänglichen privaten Flächen und im privaten Depot (Agora Verkehrswende, 2024). [↘ ZIFFER 116](#) Der öffentlichen Hand kommt dabei die Rolle zu, Koordinationsprobleme beim Aufbau der Ladeinfrastruktur zu beheben. Mit dem sogenannten „FlächenTool“, das die Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur (NLL) im Auftrag des Bundes aufgebaut hat und verwaltet, steht eine sinnvolle digitale Informationsplattform zur Verfügung, damit privates und öffentliches Flächenangebot zügig und unbürokratisch mit einer entsprechenden Nachfrage zusammenfinden kann. Eine regionale Ermittlung des künftigen Bedarfs für Ladeinfrastruktur auf Basis von Verkehrsströmen, sozioökonomischer Daten sowie Nutzer- und Raumstrukturen, ermöglicht das „StandortTool“. Zusätzlich könnte eine E-Mobilitäts-Beratung nach dem Modell der Energieberatung dazu beitragen, Speditionen beim Antriebswechsel der Flotte sowie der Planung von Ladesäulen im Depot und entsprechenden Netzanschlussbegehren zu unterstützen und Unsicherheiten zu reduzieren. Darüber hinaus sollte erwogen werden, die Investitionskostenförderung für den Aufbau von Ladestationen im privaten Depot für die Phase des Markthochlaufs wieder aufzunehmen. Damit dürften sich hohe Potenziale für die Dekarbonisierung im Güternah- und Verteilverkehr heben lassen. [↘ ZIFFER 109](#)
143. Um einen diskriminierungsfreien Zugang zu Flächen und Fördermitteln zu sichern, ist die öffentliche Ausschreibung prinzipiell ein geeignetes Instrument. Vor diesem Hintergrund ist es zu begrüßen, dass die aktuell geplante Vergabe für das initiale Ladenetz für LKW mittels Ausschreibungen erfolgen soll. [↘ ZIFFER 122](#) Bei der konkreten **Ausgestaltung der Ausschreibungen** ist jedoch **auf deren Markt- und Wettbewerbskonformität zu achten**. So bestehen Zweifel, ob hinreichende Gründe für eine weitreichende Übernahme des Betriebs- und Auslastungsrisikos sowie die geplanten Zuschlagskriterien durch den Bund [↘ ZIFFER 122](#) gegeben sind (Monopolkommission, 2021, 2023b). Die NLL begründet

dies mit dem Vorliegen von Marktversagen und damit, der Entstehung marktbeherrschender regionaler Wettbewerbskräfte entgegenwirken zu wollen (Hanken, 2024; Pallasch, 2024). Durch die beabsichtigten Leistungs- und Preisvorgaben werden jedoch regulierungsähnliche Maßstäbe gesetzt. Aufgrund der bestehenden kartellrechtlichen Eingriffsmöglichkeiten ist nicht ersichtlich, warum diese für den Aufbau und Betrieb öffentlich zugänglicher Ladeinfrastruktur erforderlich sind, zumal es bisher keine belastbaren Hinweise darauf gibt, dass die Ladestrompreise in Deutschland systematisch missbräuchlich überhöht wären (Bundeskartellamt, 2021; Monopolkommission, 2023b). Vielmehr entsteht durch kleinteilige Vorgaben das Risiko langwieriger und bürokratischer Prozesse rund um die Ausschreibungen (Tartler, 2023; Andreae, 2024; von Knobelsdorff, 2024).

144. Bereits im Vorfeld der geplanten Ausschreibungen bestehen verschiedene **Hemmnisse**, die die **Bereitstellung öffentlicher Flächen des Bundes** für den Aufbau des initialen Lade- und Tankstellennetzes **verzögern**. [↘ ZIFFER 121](#) So müssen die Standorte, die durch die NLL entlang der Autobahnen identifiziert wurden und die für die Ausschreibungen des Bundes potenziell in Frage kämen, nun zunächst noch ein zeitintensives Netzanschlussbegehren [↘ ZIFFER 118](#) durchlaufen. Der zügigen Bearbeitung dieser Anfragen sollte durch die Netzbetreiber eine hohe Priorität eingeräumt werden. Hinzu kommt, dass der **Aufbau von Ladestationen an bewirtschafteten Autobahnraststätten durch** das derzeit anhängige **Verfahren gegen die Autobahn GmbH verzögert wird**. [↘ ZIFFER 122](#) Für den Markthochlauf von BE-LKW ist das ungünstig, da der elektrifizierte Straßengüterfernverkehr auf Lademöglichkeiten entlang der Autobahnen angewiesen ist und unbewirtschaftete Rastanlagen für die Pausenzeiten der LKW-Fahrer naturgemäß deutlich unattraktiver sind. Es muss dringend eine rechtssichere Lösung gefunden werden, damit der Aufbau der PKW- und LKW-Ladeinfrastruktur an bewirtschafteten Autobahnraststätten weitergeführt werden kann. Eine Voraussetzung dafür könnte sein, mit dem Konzessionär der Rastanlagen ergänzende vertragliche Vereinbarungen über den Zugang dritter Ladesäulenbetreiber zu den Rastanlagen und über die dafür zu verlangenden Entgelte in Form von Konzessionsabgaben bzw. Pachtzinsen zu treffen (Monopolkommission, 2023b).
145. Informationen zu den Netzkapazitäten eines möglichen Standorts für Ladesäulen sowie zu den Kosten der Netzanschlüsse müssen derzeit für jedes Projekt individuell angefragt werden, was häufig mit langen Wartezeiten verbunden ist. [↘ ZIFFER 118](#) Sinnvoller wäre es, wenn **interaktive Netzkarten** zu Anschlusskapazitäten auf der Hoch- und Mittelspannungsebene kostenfrei und öffentlich verfügbar wären und **für die Standortplanung beim Aufbau einer flächendeckenden Ladeinfrastruktur** in Deutschland genutzt werden könnten. Digitale Netzkarten werden beispielsweise in Teilen der USA (Bialek et al., 2023) und Belgiens (Verdoodt, 2024) bereits genutzt. Auf diese Weise könnten künftig Standorte bereits vorausschauend so ausgewählt werden, dass sie die Anforderungen an heutige und zukünftige Netzkapazitäten erfüllen. Um eine solche Karte deutschlandweit aufzubauen, müssten alle Verteilnetzbetreiber Informationen zu ihren Netzkapazitäten regelmäßig an eine zentrale Stelle, beispielsweise die Bundesnetzagentur oder die NLL melden. Der NLL liegen auch Informationen zu ge-

eigneten Flächen für PKW- und LKW-Ladeinfrastruktur vor sowie dazu, wo welche Nachfrage von BE-LKW zu erwarten sein könnte. ↘ ZIFFER 144 Diese Daten könnten verknüpft werden, sodass eine umfassende Informationsgrundlage für potenzielle Ladesäulenbetreiber, Netzbetreiber und Politik entstehen würde.

146. Die durch die AFIR vorgeschriebene Mindest-Ladeleistung bis zum Jahr 2030 entlang der Autobahnen dürfte nicht ausreichend sein, um den Güterfernverkehr in Deutschland zu elektrifizieren (Plötz et al., 2024). ↘ KASTEN 18 Dies erfordert, zumindest perspektivisch, den Aufbau einer Schnellladeinfrastruktur entlang der Autobahnen. **Deutschland sollte die Mindestanforderungen an Ladekapazitäten von AFIR daher möglichst übererfüllen.**

Der Aufbau von Ladeinfrastruktur für BE-LKW entlang der Autobahnen kann nicht warten, bis der MCS-Standardisierungsprozess abgeschlossen ist. Insofern ist es richtig, den **Aufbau** des initialen Ladenetzes für LKW bereits heute, **basierend auf dem aktuellen CCS-Standard**, voranzutreiben. Um die Auslastung zu erhöhen und zudem Netzbedarfe zu optimieren, ↘ ZIFFER 119 ist es ohnehin sinnvoll, an den Ladestandorten die gemeinsame Nutzung für MCS-Laden und CCS-Laden, beispielsweise für das Übernachten, zu ermöglichen. ↘ ZIFFER 116 An jedem Standort des initialen Ladenetzes ist derzeit mindestens ein MCS-Ladepunkt vorgesehen und im Schnitt sind fünf MCS-Ladepunkte mit hohen Ladeleistungen an jedem Standort geplant. Insgesamt dürften so **1 800 MCS-Ladepunkte entlang der Autobahnen in Deutschland** entstehen. Das stellt eine sehr gute Basis für den Hochlauf von BE-LKW dar und könnte, sofern der geplante Aufbau der Ladestationen bis zum Jahr 2030 gelingt und die Standorte strategisch gewählt wurden (Balke et al., 2024a), **theoretisch ausreichen, um den Straßengüterfernverkehr in Deutschland vollständig zu elektrifizieren** (Balke et al., 2024a, 2024b; Plötz et al., 2024). ↘ KASTEN 18 Für einen schnelleren Markthochlauf sollte der Aufbau einer weiterführenden Schnellladeinfrastruktur bereits heute mit Blick auf den benötigten Stromnetzausbau sowie die benötigten Flächen geplant werden.

147. Die **Höhe der Marktpreise für Ladestrom** ist ein **zentraler Hebel um TCO-Kostenparität** zwischen BE-LKW und Diesel-LKW **zu erreichen**. ↘ ZIFFER 114 Die Preise unterscheiden sich europaweit deutlich, oft zwischen Standorten in benachbarten EU-Mitgliedstaaten, und werden vor allem durch Unterschiede in den Netzentgelten getrieben (Hildermeier und Jahn, 2024). Hier bestehen Potenziale, insbesondere die Kosten für Schnellladen in Deutschland zu senken (ACER, 2023; Hildermeier und Jahn, 2024). Zudem bestehen nach wie vor ungenutzte Potenziale bei der Stromsteuer, die auf den europäischen Mindestsatz gesenkt werden könnte (JG 2020 Ziffer 391; JG 2022 Ziffer 196; JG 2023 Ziffer 173). Darüber hinaus bestehen **hohe Synergieeffekte** zwischen der **Erzeugung erneuerbarer Energien entlang der Autobahnen sowie am LKW-Depot und dem Netzausbau für die Ladeinfrastruktur** (Biedenbach und Blume, 2023). ↘ KASTEN 16 Beim Aufbau von Ladeinfrastruktur im privaten Depot sollte daher der kombinierte Aufbau mit Photovoltaikanlagen mitgedacht werden. Der Verkauf von lokalem PV-Strom an fremde Unternehmen (Frachtführer) ist für Gebäudeeigentümer allerdings regulatorisch schwierig; un-

ter Umständen muss eine Registrierung als Energieversorgungsunternehmen erfolgen (Next, 2024). Eine Senkung der Markteintrittshürden kann die Anreize für Investitionen in Photovoltaik-Anlagen im privaten Depot stärken.

148. **Um die deutsche und europäische Versorgung mit Wasserstoff sicherzustellen, ist ein weitreichendes Versorgungsnetz innerhalb Europas erforderlich** (JG 2022 Kasten 26). Dessen Aufbau ist sinnvoll, unabhängig von der Frage, welche Rolle die Technologie im Straßengüterverkehr künftig spielen wird. Bei knapper Verfügbarkeit von und hoher Nachfrage nach grünem Wasserstoff wird dem Einsatz von Wasserstoff dort Priorität eingeräumt werden, wo eine Elektrifizierung von Prozessen besonders schwierig ist (Schreyer et al., 2024). Dies ist insbesondere in der Stahlindustrie und Grundstoffchemie der Fall, wo keine ökonomisch attraktiven Alternativen zur Wasserstoffnutzung bestehen dürften (Wietschel et al., 2023).

Technologieoffen bleiben – öffentliche Mittel effizient priorisieren

149. Im Güterverkehr werden derzeit sowohl von LKW-Herstellern als auch von der Politik mehrere infrage kommende technologische Alternativen für emissionsfreie Antriebe unterstützt, wobei der batterieelektrische Antrieb im Mittelpunkt der Strategien von LKW-Herstellern steht (NOW, 2023a). Das **Verfolgen paralleler Technologiefade ermöglicht einen Wettbewerb** zwischen unterschiedlichen Technologien, ist **jedoch mit erhöhten Investitionskosten** und Unsicherheiten sowohl für Anbietende als auch für die Nutzenden und die öffentliche Hand verbunden (Jaffe et al., 2005; Azar und Sandén, 2011; Krutilla und Krause, 2011; Monopolkommission, 2015b).
150. **Technologieneutrale Anreize für die Dekarbonisierung** des Güterverkehrs setzen insbesondere der **nationale CO₂-Preis im Verkehrssektor**, das zukünftige europäische Emissionshandelssystem **EU-ETS II** und die **CO₂-basierte LKW-Maut**. Um die Planungssicherheit hinsichtlich zukünftiger CO₂-Preise im Verkehrssektor zu erhöhen, sollte Deutschland erwägen, einen nationalen CO₂-Mindestpreis einzuführen (Edenhofer et al., 2019; Wissenschaftlicher Beirat beim BMWi, 2019; SG 2019 Ziffern 141 ff.). Technologieneutralität ist auch für die **wissenschaftliche Grundlagenforschung**, beispielsweise bei der Weiterentwicklung von Antriebssystem, Antriebskomponenten und energetischer Effizienz sowie der Entwicklung von Nachnutzungskonzepten für LKW-Komponenten zentral. Mit Hilfe von resultierenden Wissens-Spillovern kann Forschung einen wichtigen Beitrag leisten, frühzeitig Kompetenzen zu schaffen, während sich die Technologien etablieren (JG 2020 Ziffern 436 ff.).
151. Marktbasierte Anreizmechanismen können aufgrund von Marktunvollkommenheiten unzureichend bleiben. Begleitende Maßnahmen können daher erforderlich sein (Edenhofer et al., 2019; Stiglitz, 2019). **Im Verkehrssektor erschweren Netzwerkeffekte den Markthochlauf emissionsarmer Fahrzeuge** (Li et al., 2017; Springel, 2021; Rapson und Muehlegger, 2023). Der Umstieg auf emissionsarme LKW ist für Unternehmen nur dann wirtschaftlich sinnvoll, wenn gleichzeitig eine ausreichende Lade- bzw. Tankinfrastruktur vorhanden ist. Die **Förderung öffentlich zugänglicher Lade- und Tankinfrastruktur** kann

dazu beitragen, solche Koordinations- und Netzwerkexternalitäten zu adressieren, und helfen, dass technologieneutrale Anreize wie der CO₂-Preis eine stärkere Anpassungsreaktion gewährleisten.

- 152. Damit die gesamtwirtschaftlichen Kosten zur Erreichung der Klimaziele so niedrig wie möglich ausfallen, sollten öffentliche Mittel dort eingesetzt werden, wo sie eine besonders starke Hebelwirkung entfalten.** Volkswirtschaftlich effizient werden THG-Emissionen reduziert, indem jeweils die nach dem Stand der technischen Möglichkeiten besonders einfach zu hebenden Potenziale („low hanging fruits“) zuerst genutzt werden. Durch technologischen Fortschritt wird es dann über die Zeit möglich, weitere notwendige Emissionseinsparungen günstiger zu erzielen. Eine Fokussierung öffentlicher Fördermaßnahmen trägt dazu bei, Planungsunsicherheiten für private Akteure zu reduzieren und gleichzeitig bei knappen Kassen die verfügbaren Mittel effizient einzusetzen. Damit eine solche Priorisierung nicht durch Interessengruppen vereinahmt wird (Baldwin und Robert-Nicoud, 2007), sollten hierbei strenge und transparente Kriterien angelegt werden. Dabei sollte die Erfolgswahrscheinlichkeit berücksichtigt werden, mit der eine neue Technologie bereits in näherer Zukunft zum gesellschaftlichen Ziel der Dekarbonisierung beizutragen vermag.
- 153.** Viele Lösungen zur Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs sind technisch in der längeren Frist vermutlich möglich, in der kürzeren Frist aber nicht alle gleichermaßen realisierbar. Vier Kriterien sind besonders wichtig für die Bestimmung der **Wahrscheinlichkeit**, dass eine **Technologie den Straßengüterverkehr in der näheren Zukunft effektiv dekarbonisiert** (ITF, 2023b): Erstens, der **Reifegrad** der Technologie. Zweitens, das Potenzial, gegenüber dem Diesel-LKW und emissionsarmen Alternativen **wettbewerbsfähig** zu werden. Drittens, das **Emissionsreduktionspotenzial** und viertens, das Potenzial für einen **schnellen Markthochlauf**. ↘ [TABELLE 11](#) Unter Berücksichtigung dieser Kriterien zeigt sich, dass sich für den BE-LKW derzeit die höchste Wahrscheinlichkeit für eine erfolgreiche Marktetablierung bis zum Jahr 2030 ergibt. Für diese Technologie ist eine Marktreife bereits erreicht bzw. steht unmittelbar bevor. ↘ [ZIFFER 104](#) ↘ [KASTEN 15](#) Bereits heute können LKW des Güternah- und Verteilverkehrs zu kompetitiven TCO batterieelektrisch betrieben werden. ↘ [ZIFFERN 108 FF](#). Hier bestehen hohe Potenziale für kurzfristige Emissionsreduktionen im Straßengüterverkehr, die mit bereits verfügbaren Ladetechnologien und Reichweiten realisiert werden können.
- 154.** Vor dem Hintergrund der europäischen Klimaziele bis zum Jahr 2030 sollte daher der **Schwerpunkt staatlichen Handelns** zunächst **auf einer Marktdurchdringung von BE-LKW** liegen, denn nur dies gewährleistet zeitnahe Erfolge bei der Dekarbonisierung. Der limitierende Faktor ist derzeit die Verfügbarkeit der Infrastruktur. Der Aufbau der Ladeinfrastruktur sollte deshalb prioritär vorangetrieben werden. Vor dem Hintergrund knapper öffentlicher Mittel und Planungskapazitäten sind nur mit einer solchen Fokussierung deutliche Fortschritte bei der Dekarbonisierung des Güterverkehrs bis zum Jahr 2030 zu erreichen. Dies beschleunigt zudem die Technologieskalierung. Die Politik garantiert dadurch eine hohe Nutzungsintensität der Ladeinfrastruktur. Dies senkt die Kos-

▸ TABELLE 11

Alternative Antriebstechnologien für LKW und ihr Beitrag zur Dekarbonisierung des Güterverkehrs

	Technologiereife ¹	Wettbewerbsfähigkeit ²	Emissionsminderungspotenzial	Geschwindigkeit ³
BE-LKW (Nahverkehr)	TRL 9	Wahrscheinlich	Wahrscheinlich	Wahrscheinlich
BE-LKW (Fernverkehr)	Fahrzeug: TRL 8/9	Wahrscheinlich	Wahrscheinlich	Wahrscheinlich
	Laden mit < 350 kW: TRL 8			
	Laden mit > 1 MW: TRL 6/7			
BE-LKW mit Batterie-wechsel	TRL 8/9	Ungewiss	Wahrscheinlich	Ungewiss
FCE-LKW	Fahrzeug: TRL 8/9	Herausfordernd	Kurzfristig herausfordernd	Herausfordernd
	Tanken mit hoher Fließgeschwindigkeit: TRL 4		Langfristig möglich	
LKW mit Oberleitung	TRL 8	Möglich	Wahrscheinlich	Herausfordernd
LKW mit E-Fuels	TRL 6	Unwahrscheinlich	Unwahrscheinlich	Unwahrscheinlich

1 – Der ETP-Leitfaden für saubere Energietechnologien ist ein interaktiver Rahmen, in dem die Internationale Energieagentur (IEA) Informationen zu über 550 einzelnen Technologiekonzepten und -komponenten für das gesamte Energiesystem bereitstellt, die zur Erreichung des Ziels von Klimaneutralität beitragen. Für jede dieser Technologien enthält der Leitfaden Informationen zum Reifegrad, dem Technology Readiness Level (TRL). Das TRL ist eine Skala zur Bewertung des Entwicklungsstandes von neuen Technologien auf der Basis einer systematischen Analyse. Entwickelt wurde die Methodik 1988 von der NASA für die Bewertung von Raumfahrttechnologien, davon ausgehend hat sie sich als Bewertungsstandard in weiteren Bereichen verschiedener Technologiebereiche etabliert. Die IEA verwendet eine Skala von 1 („initial idea“) bis 11 („proof of stability reached“). 2 – Wettbewerbsfähige Gesamtbetriebskosten. 3 – Schneller Markthochlauf.

Quellen: IEA, ITF (2023b), eigene Darstellung
 © Sachverständigenrat | 24-106-02

ten und steigert wiederum die Wahrscheinlichkeit, dass der BE-LKW wirtschaftlich wird. ▸ ZIFFER 112 **Die Wahrscheinlichkeit, dass sich diese Investitionen zukünftig als Fehler herausstellen, ist gering („No-regret“)**. Dies gilt umso mehr, da zwischen dem Hochlauf von BE-LKW und BE-PKW, die sich gegenüber emissionsarmen Alternativen bereits weitgehend am Markt durchgesetzt haben, hohe Synergien bestehen. Synergieeffekte bestehen auch beim Netzausbau für Lademöglichkeiten entlang der Autobahnen, wo Flächen künftig ohnehin verstärkt für die erneuerbare Energieerzeugung genutzt werden sollen (BMWK, 2023c).

155. Die Privatwirtschaft hat diesen Weg bereits eingeschlagen. Deutsche LKW-Hersteller sind EU-weit führend beim Verkauf emissionsarmer LKW (Mulholland und Egerstrom, 2024). Traditionell nimmt Europa auch weltweit eine führende Rolle in der Nutzfahrzeugtechnologie ein. Bei Europas größten LKW-Herstellern (Daimler Truck, Traton Group und Volvo Group) können bereits heute batterieelektrische Lösungen für alle LKW-Segmente, inklusive der schweren Klasse, ▸ PLUSTEXT 1 bestellt werden (Daimler Truck, 2024; Traton, 2024; Volvo, 2024). Für den anspruchsvollen Langstrecken-Straßentransport halten zwei dieser drei Hersteller sich noch die Option offen, dass dieses Einsatzprofil künftig auch durch den FCE-LKW abgedeckt werden könnte, ▸ ZIFFER 104 weswegen sie in der zweiten Hälfte des Jahrzehnts die Serienreife entsprechender schwerer FCE-LKW anstreben (Daimler Truck, 2024, S. 12; Volvo, 2024, S. 24). Für die anderen LKW-Segmente, die insbesondere Einsatz im Nah- und Verteil-

verkehr finden, bieten diese Hersteller keine FCE-LKW an und ihre Unternehmensstrategien sehen dies auch perspektivisch nicht vor (Daimler Truck, 2024; Traton, 2024; Volvo, 2024). Den Aufbau einer Ladeinfrastruktur für BE-LKW treiben die drei LKW-Hersteller gemeinsam entschieden voran. Über das Joint Venture Milence sollen bis zum Jahr 2027 mindestens 1 700 öffentlich zugängliche Schnellladepunkte an und in der Nähe von Autobahnen sowie an Logistik-Hubs in Europa entstehen. Dass die Hersteller sich insgesamt **mehr Verbindlichkeit und Investitionssicherheit von der Politik** wünschen, zeigt nicht zuletzt die jüngste Diskussion über die Verschärfung der europäischen Flottenziele. [↘ ZIFFER 88](#) Bei dieser setzte sich das BMDV dafür ein, dass auch E-Fuels auf die CO₂-Flottenziele angerechnet werden dürfen, während LKW-Hersteller und Zulieferer appellierten, unabhängig davon einer Verschärfung der Regulierung zuzustimmen, da im Fokus der Privatwirtschaft der zügige Hochlauf von BE-LKW stehe (Handelsblatt, 2024b; Mortsiefer, 2024).

156. BE-LKW bilden die technische Basis für den FCE-LKW. Die **verbleibende Ungewissheit** in Bezug auf den Wettbewerb zwischen Wasserstoff und Strom **im schweren Güterfernverkehr** kann daher mit einem **adaptiven Politikan-satz** angegangen werden (Schreyer et al., 2024). Solange die künftige Verfügbarkeit und die Preise von grünem Wasserstoff ungewiss sind, sollte für diese Anwendung auch die direkte Elektrifizierung durch den BE-LKW bevorzugt werden, während Wasserstoffoptionen weiter entwickelt, getestet und demonstriert werden können.

Auf dieser Grundlage kann in den kommenden Jahren ein besseres Verständnis für mögliche technische Grenzen des BE-LKW in anspruchsvollen Anwendungsfällen entwickelt sowie die Praxistauglichkeit der entstehenden Schnellladeinfrastruktur für hohe Reichweiten erprobt werden. Sollten diese den Einsatz von FCE-LKW technisch erforderlich machen oder sich herausstellen, dass der Einsatz von FCE-LKW gegenüber BE-LKW künftig kostengünstiger ist, sollte dieser Ansatz in Richtung einer größeren Rolle des Wasserstoffs angepasst werden. Der Aufbau von Infrastrukturen mit langen Vorlaufzeiten, wie z. B. Wasserstoffpipelines, für die hohe Synergieeffekte mit der industriellen Wasserstoffnutzung bestehen, könnte diese Unwägbarkeiten berücksichtigen und leicht überdimensioniert sein, um auch für optimistische Wasserstoffsznarien vorbereitet zu sein. **Auf eine öffentliche Förderung von Wasserstofftankstellen** sowie den Aufbau von kostenintensiven Verteilinfrastrukturen für Wasserstofftankstellen [↘ KASTEN 17](#) sollte hingegen **zunächst verzichtet werden**.

157. Verschiedene Studien unterstreichen die **Bedeutung des Aufbaus einer öffentlichen Lade- und Tankinfrastruktur** für die Marktdurchdringung emissionsarmer Antriebe und damit **für die Dekarbonisierung des Güterverkehrs**. Sie stellen Szenarien zum zukünftigen Bestand schwerer Nutzfahrzeuge des Verkehrssektors in Deutschland bis zum Jahr 2045 auf. Diese Szenarien haben nicht den Anspruch, die wahrscheinlichsten Pfade darzustellen, sondern spiegeln vielmehr unterschiedliche Annahmen beispielsweise über die künftige technologische Entwicklung und die politische Unterstützung wider und beleuchten die Auswirkungen dieser Annahmen auf den möglichen Lösungsraum. So zeigen

etwa die Langfristszenarien für die Transformation des Verkehrssektors (Fraunhofer ISI et al., 2024) ↘ **ABBILDUNG 49** je nach Annahme unterschiedliche Anteile verschiedener Antriebstechnologien am Bestand der schweren Nutzfahrzeuge im Jahr 2045. In einem Szenario (T45-H2) wird angenommen, dass bis 2030 keine öffentlich verfügbare Ladeinfrastruktur für BE-LKW aufgebaut wird, sondern stattdessen zu diesem Zeitpunkt nur eine öffentliche Infrastruktur für Wasserstofftankstellen existiert. Unter dieser Annahme folgt im Jahr 2045 ein vergleichsweise großer Bestand an FCE-LKW bei Einsatzprofilen mit hoher Fahrleistung. Denn ohne öffentliche Ladeinfrastruktur kann nur der Teil der Flotte batterieelektrisch betrieben werden, der ohne öffentliches Nachladen auskommt (Fraunhofer ISI et al., 2024, S. 27). Gleichzeitig verdeutlichen die Langfristszenarien aber, dass aufgrund der **Effizienz- und Kostenvorteile des batterieelektrischen Antriebs** der Aufbau einer öffentlichen Ladeinfrastruktur für BE-LKW zu einer schnelleren Marktdurchdringung mit emissionsarmen LKW und somit einer schnelleren Dekarbonisierung führt als der Aufbau einer Infrastruktur für Wasserstofftankstellen (Fraunhofer ISI et al., 2024, S. 9).

- 158. Den Ausbau des Tankstellennetzes für Wasserstoff aus industriepolitischen Gründen staatlich zu forcieren, erscheint ordnungspolitisch fragwürdig.** ↘ **ZIFFERN 173 FF.** Hierfür müsste überzeugend argumentiert werden, warum in diesem konkreten Fall der Staat besser als die Unternehmen absehen kann, welche Technologie und damit welches Geschäftsmodell sich durchsetzen wird bzw. durchsetzen sollte („picking winners“). Die bereits bestehende Marktreife der BE-LKW lässt keinen Zweifel daran, dass dieser Antrieb in der Zukunft breite Anwendung finden wird. Dagegen geben die Entwicklungspläne für emissionsarme Antriebe der europäischen LKW-Hersteller keinen Anlass zur Annahme, dass sie davon ausgehen, dass sich daneben auch der FCE-Antrieb, von Nischenanwendungen abgesehen, durchsetzen wird. Eine zu frühe Errichtung eines Wasserstofftankstellennetzes in Deutschland, noch bevor klar ist, welche Transport- und Anlieferoptionen sowie notwendige Speicher- und Aufbereitungsanlagen dafür benötigt werden, ↘ **KASTEN 17** birgt außerdem das Risiko, in eine Technologie zu investieren, die sich im Nachhinein als nicht marktfähig erweist und damit in einer Investitionsruine mündet. Dies ist bei den bereits existierenden Wasserstofftankstellen zu beobachten, die allem Anschein nach sowohl in Deutschland als auch in einigen anderen Ländern nach und nach zurückgebaut werden, weil sie den Marktstandards nicht mehr entsprechen. ↘ **ZIFFER 124**
- 159.** Die AFIR ↘ **KASTEN 18** gibt den Aufbau paralleler Lade- bzw. Tankinfrastrukturen für den BE-LKW und den FCE-LKW bis zum Jahr 2030 vor. Studien kommen zu dem Schluss, dass in fast allen europäischen Mitgliedstaaten noch erheblicher Nachholbedarf beim Aufbau von Ladestationen für BE-LKW besteht, um die Ziele der AFIR zu erreichen. Wasserstofftankstellen für den Hochlauf emissionsarmer Nutzfahrzeuge dürften in Europa diesen Abschätzungen zufolge hingegen erst frühestens im Jahr 2035 benötigt werden (Ragon et al., 2022; Mulholland und Egerstrom, 2024). Für Ende des Jahres 2024 sieht die **AFIR eine offizielle Zwischenevaluation** (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union, 2023) vor. In diesem Zuge soll **die Technologie- und Marktreife von schweren Nutzfahrzeugen neu bewertet** werden. Je nach Ergebnis dieser Bewertung kann die EU-Kommission Vorschläge zur Änderung der

AFIR vorlegen. Die Bundesregierung plant, der EU-Kommission Ende dieses Jahres eine Analyse über zukünftige Bedarfe aller mit der AFIR regulierten Infrastrukturen für alternative Kraftstoffe vorzulegen. Der Hochlauf des emissionsarmen Straßengüterverkehrs sollte europäisch koordiniert erfolgen. Die Zwischenevaluation von AFIR bietet Deutschland die Möglichkeit, sich mit weiteren europäischen Mitgliedstaaten zu koordinieren und gemeinsam die Potenziale der verschiedenen Antriebstechnologien für eine effiziente kurzfristige Dekarbonisierung neu zu bewerten.

Eine andere Meinung: Mit langfristiger Perspektive ein breites Technologie-Portfolio stärken

160. Ein Mitglied des Sachverständigenrates, Veronika Grimm, kann sich der Mehrheitsposition des Sachverständigenrates im Kapitel „Güterverkehr zwischen Infrastrukturanforderungen und Dekarbonisierung“ in einigen Punkten nicht anschließen. Dies betrifft Teile der Ausführungen und Handlungsempfehlungen zum Straßengüterverkehr. Die Darstellung und Einordnung der verschiedenen Optionen im straßengebundenen Güterverkehr [↘] ZIFFERN 67 F., 102 FF. UND 140 FF. lässt relevante Perspektiven und Szenarien außer Acht und fokussiert zu stark auf die kurze und mittlere Frist. Dies ist zu bemängeln, da **langfristige Entwicklungen und industriepolitische Chancen bei der Ableitung kurzfristiger Handlungsempfehlungen zwingend mitgedacht werden sollten**, denn:
- Die Klimaziele der Bundesregierung für das Jahr 2045 sind nur zu erreichen, wenn eine Vielfalt von Technologieoptionen hinreichend schnell nutzbar wird, sodass sie zur Emissionsminderung rechtzeitig vor dem Jahr 2045 beitragen können. Eine **Beschränkung auf diejenigen Technologien, die zum aktuellen Zeitpunkt bereits ausgereift sind, verbaut die Entdeckung von Umsetzungschancen**, und **gefährdet somit den Transformationsprozess**. Sie lässt sich daher durch Hinweise auf die kurzfristige Dringlichkeit der Emissionsminderung nicht rechtfertigen.
 - Wenn Deutschland und Europa **langfristige Perspektiven der Technologieentwicklung außer Acht lassen**, indem sie sich ausschließlich auf aktuell ausgereifte Technologien konzentrieren, **setzen sie ihre Wettbewerbsfähigkeit bei wichtigen Zukunftstechnologien aufs Spiel**. Schließlich sind ohne umfangreiche Innovationen weder die von Europa angestrebte globale Technologie- und Marktführerschaft noch in der Folge ein entsprechender Beitrag zum Prosperitätswachstum denkbar.
 - Darüber hinaus kann eine zu **enge Fokussierung auf die direkte Elektrifizierung im Verkehr zu Herausforderungen in der Umsetzungspraxis und zu einseitigen Abhängigkeiten führen**. So könnte es bei der vollen Skalierung der Technologien, etwa aufgrund von Versorgungsengpässen bei Vorprodukten oder aufgrund von Hemmnissen beim Ausbau der Infrastruktur, zu erheblichen Verzögerungen kommen. In einem solchen Falle wird es missionskritisch sein, eine Reihe von Technologieoptionen zur Verfügung zu haben, nicht nur eine einzige.

161. Vor diesem Hintergrund erscheint es nicht zielführend, aufgrund der schnelleren Marktreife von batterieelektrischen LKW (BE-LKW) die Vorbereitung des Markthochlaufs anderer Technologieoptionen mit geringerer Priorität voranzutreiben. **Die ambitionierten Klimaziele erfordern** – gerade weil die Bedeutung von Mobilität nicht ab- sondern zunehmen wird – im Verkehrssektor **vorausschauendes politisches Handeln, das den technologischen Fortschritt weitestmöglich für die Transformation nutzbar macht**. Insofern stehen die Antriebstechnologien im Güterverkehr nicht in Konkurrenz, sondern ergänzen sich auf dem Weg zur Klimaneutralität.

Verkehrsszenarien bieten Orientierung, geben aber keine Handlungsanleitung

162. Um politische Entscheidungen an aktuellen Einschätzungen des Lösungsraums orientieren zu können, werden regelmäßig im Rahmen von Systemstudien sowie in sektorspezifischen Analysen die **möglichen Dekarbonisierungspfade abgeschätzt** (unter anderem EWI, 2021; Fraunhofer ISI et al., 2021; Luderer et al., 2021; BCG, 2021; Stolten et al., 2022; acatech et al., 2023; Fraunhofer ISI et al., 2024).
163. Die Zielsetzung der Klimaneutralität bis zum Jahr 2050 im Rahmen des im Jahr 2019 vorgestellten Green Deal und das Vorziehen des Klimaneutralitätsziels für Deutschland auf das Jahr 2045 durch das Klimaschutzgesetz aus dem Jahr 2021 hat die Ergebnisse der Systemstudien maßgeblich verändert. Insbesondere müssen nun auch im Güterverkehr klimaneutrale Lösungen für sämtliche Anwendungen gefunden werden. Mit Blick auf den straßengebundenen Güterverkehr **gehen die aus den Szenarien abgeleiteten Einschätzungen zum zukünftigen Technologiemarkt weit auseinander, da heute noch große Unsicherheiten bestehen** (acatech et al., 2023; Fraunhofer ISI et al., 2024). Dies betrifft etwa die rechtzeitige Verfügbarkeit von Infrastrukturen (EWK, 2024; Weiss et al., 2024), die zu erwartenden Strom- und Treibstoffpreise ^{↘ ZIFFERN 170 FF.} sowie die Kosten der Fahrzeuge unter Einbeziehung von Nachnutzungsoptionen. Zudem wurde der Wechsel zu 100 %-Klimaneutralitätsszenarien erst mit einer gewissen Verzögerung in den Studien konsequent umgesetzt.
164. Die jüngeren **Systemstudien für Deutschland projizieren** überwiegend eine **Mischung von Antriebstechnologien im Schwerlastverkehr**, wobei die direkte Elektrifizierung, also der Einsatz von BE-LKW, in den allermeisten Szenarien zum Güterverkehr den größten Anteil hat. Je nach Szenario nutzen in den Studienergebnissen 0 % bis zu 75 % der LKW in der Schwermobilität Wasserstoff (acatech und DECHEMA, 2022). Szenarien der dena-Leitstudie (2021) und des Kopernikus-Projekts Ariadne (Luderer et al., 2021) gehen für das Jahr 2050 von jährlich etwa 40 bis 50 TWh Wasserstoffbedarf im LKW-Verkehr aus (acatech und DECHEMA, 2022). Vor dem Hintergrund der im Mai 2024 absehbaren Verschärfung der europäischen kurz- und mittelfristigen CO₂-Emissionsreduktionsziele für schwere Nutzfahrzeuge erwartet der Nationale Wasserstoffrat (NWR) in seiner jüngsten Bedarfsschätzung bereits im Jahr 2030 einen Wasserstoffbedarf von etwa 22 TWh für LKW und Busse (NWR, 2024). Für das Jahr 2035, in dem nach der Verschärfung für schwere Nutzfahrzeuge die CO₂-Emissionen um 65 %

gegenüber dem Jahr 2019 gesenkt werden müssten, erwartet der NWR für diese Fahrzeugklassen einen Wasserstoffbedarf von etwa 58 TWh.

165. Die im Februar 2024 veröffentlichten Langfristszenarien für die Transformation des Verkehrssektors (Fraunhofer ISI et al., 2024), die im Rahmen des Projekts „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland“ (Langfristszenarien 3) im Auftrag des BMWK erstellt wurden, untersuchen in einer Reihe von Szenarien unterschiedliche denkbare Entwicklungen des Gesamtsystems, damit das **Spektrum der Optionen sowie die Vor- und Nachteile verschiedener Pfade** genauer **in den Blick genommen** werden können. Angesichts der zahlreichen Unsicherheiten und der verschiedenen komplementären Handlungsfelder ist dieses Vorgehen äußerst sinnvoll, im Grunde sogar unverzichtbar.
166. Die jeweils vollständig konsistent durchgerechneten Szenarien spiegeln wider, dass ganz **unterschiedliche Technologiepfade möglich** sind. ↘ ABBILDUNG 49 Wie gut sie im Einzelfall zu realisieren sein werden, hängt unter anderem davon ab, **ob verschiedene Energieträger** in hinreichender Menge und zu verkräfterbaren Preisen **zur Verfügung stehen** werden und ob die entsprechenden **Infrastrukturen verfügbar** sind. Würde die Nutzfahrzeugflotte komplett elektrifiziert, so ergäbe sich im Jahr 2045 dafür ein Strombedarf von jährlich 69 TWh. Würden auch FCE-LKW genutzt (Szenario T45-H2), so läge der jährliche Strombedarf für die BE-LKW bei lediglich 35 TWh, es würden jedoch 61 TWh Wasserstoff benötigt, zum Großteil (57 TWh) für schwere Nutzfahrzeuge. ↘ ABBILDUNG 49 RECHTS Ein Szenario, in dem ein Großteil der Schwermobilität synthetische Kohlenwasserstoffe nutzt, wird als „Fallback“ berechnet, falls die vollständige Umsetzung der anderen Pfade nicht gelingt.
167. Aktuelle wissenschaftliche **Studien für den europäischen Straßengüterverkehr** zeigen, dass **neben batterieelektrischen Antrieben zukünftig auch in Europa weitere Technologieoptionen eine Rolle spielen** dürften.
- So analysieren Shirizadeh et al. (2024) in einer iterativen Kopplung eines Energiesystemmodells mit Modellen zur Verkehrsentwicklung, dem Fahrverhalten sowie dem Gütertransport unterschiedliche Wege zur vollständigen Dekarbonisierung des europäischen Schwerlastverkehrs. Basierend auf drei unterschiedlichen Szenarien zur Verfügbarkeit von alternativen Kraftstoffen, Infrastrukturen, Energiepreisen oder zur Entwicklung des Fracht- und Fahrgastaufkommens ergeben sich unterschiedliche Pfade in der Schwerlastmobilität, bei denen BE-LKW stets eine wichtige Rolle spielen, andere Antriebskonzepte insbesondere für mittlere und lange Strecken aber ebenfalls zur Anwendung kommen.
 - Zu ähnlichen Ergebnissen kommen Schreyer et al. (2024), die basierend auf dem am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) entwickelten Integrated Assessment Model (IAM) REMIND die indirekte und direkte Elektrifizierung des europäischen Energiesystems untersuchen. Neben einer fast vollständigen Durchdringung von batterieelektrischen Antrieben im Personenverkehr zeigt sich für die Schwerlastmobilität ein diverses Bild über alle

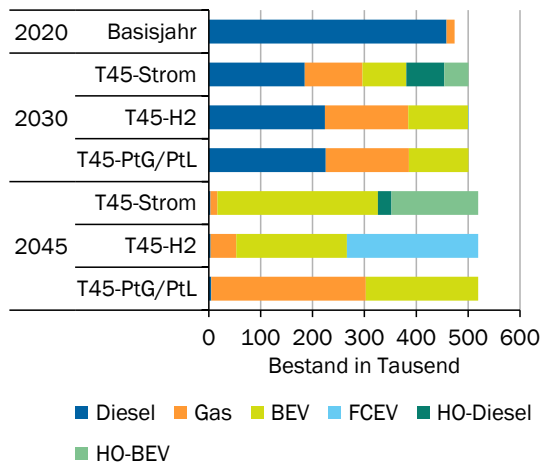
betrachteten Szenarien hinweg. Hier spielen neben BE-LKW auch FCE-LKW, Hybride Systeme, aber auch Verbrennungsmotoren eine Rolle.

- Carboni et al. (2024) analysieren mit Hilfe eines agentenbasierten IAM Szenarien zur Erreichung der Klimaneutralität des italienischen Schwerlastverkehrs unter Berücksichtigung unterschiedlicher Annahmen hinsichtlich Technologieentwicklung, Energiepreisen und politischer Regulierung. Für leichte LKW ergibt sich eine vollständige Elektrifizierung, wohingegen bei mittleren und schweren LKW batterieelektrische Antriebe keine Rolle spielen.
- Aryanpur und Rogan (2024) kommen in einer Energiesystemmodellierung für Irland zu dem Ergebnis, dass insbesondere unter Berücksichtigung von nicht ausschließlich finanziellen Faktoren wie Ladezeit oder zulässigem Gesamtgewicht auch FCE-LKW für schwere Lasten zur Anwendung kommen.

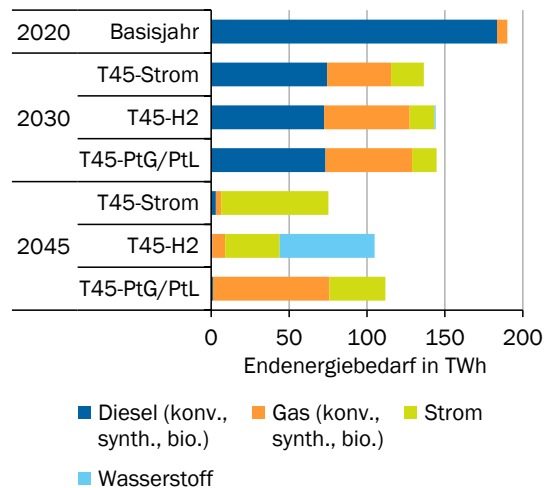
▸ **ABBILDUNG 49**

Szenarien¹ für den Schwerlastverkehr und Endenergiebedarf für Nutzfahrzeuge² in Deutschland

Bestand schwerer Nutzfahrzeuge in den Szenarien T45-Strom, T45-H2 und T45-PtG/PtL in den Jahren 2030 und 2045



Endenergiebedarf Nutzfahrzeuge in den Szenarien T45-Strom, T45-H2 und T45-PtG/PtL in den Jahren 2030 und 2045



1 – Langfristszenarien für die Transformation des Verkehrssektors (Fraunhofer ISI et al., 2024) aus dem Projekt „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland“ (Langfristszenarien 3) im Auftrag des BMWK. Die Szenarien berücksichtigen das Klimaschutzgesetz entsprechend der Novelle des Jahres 2021 mit den Sektorzielen für das Jahr 2030 und dem Ziel der Treibhausgasneutralität im Jahr 2045. Die drei Szenarien stellen „Extremwelten“ dar, um einen Orientierungsrahmen bereitzustellen. T45-Strom: starke Elektrifizierung. T45-H2: starke Nutzung von Wasserstoff. T45-PtG/PtL: starke Nutzung von synthetischen Kohlenwasserstoffen. Um eine möglichst große Bandbreite an Szenarien darzustellen wird im Szenario T45-Strom, in Anlehnung an die Methodik in Speth et al. (2022), davon ausgegangen, dass eine öffentliche Schnellladeinfrastruktur für Nutzfahrzeuge aufgebaut wird. Diese erlaubt es im Jahr 2045 jedem Fahrzeug, falls notwendig, einmal täglich öffentlich nachzuladen, was die Reichweite der Fahrzeuge verdoppelt. Zusätzlich werden 8 000 km des Straßennetzes bis zum Jahr 2045 mit Oberleitungen elektrifiziert. Auf eine Wasserstofftankstelleninfrastruktur wird hingegen verzichtet. Im Szenario T45-H2 wird angenommen, dass eine Wasserstofftankstelleninfrastruktur aufgebaut wird, die ab dem Jahr 2030 einen uneingeschränkten Betrieb von Wasserstoff-Nutzfahrzeugen ermöglicht. Es steht jedoch keine öffentliche Ladeinfrastruktur für Nutzfahrzeuge zur Verfügung. Batterieelektrische Fahrzeuge können nur an der privaten Depotinfrastruktur nachgeladen werden. 2 – Die Berechnungen zeigen einen Stand zu Beginn des Ukraine-Kriegs. Trotz der mittlerweile gesunkenen Gaspreise haben sich die Rahmenbedingungen für gasbetriebene LKW ungünstig entwickelt. Daher könnte ein großer Teil der Gas-Energiemenge weiterhin als Diesel nachgefragt werden. Die Effizienz beider Antriebe ist nahezu identisch, sodass die eingesetzten Energiemengen sehr ähnlich wären.

Quelle: Fraunhofer ISI et al. (2024)
© Sachverständigenrat | 24-126-01

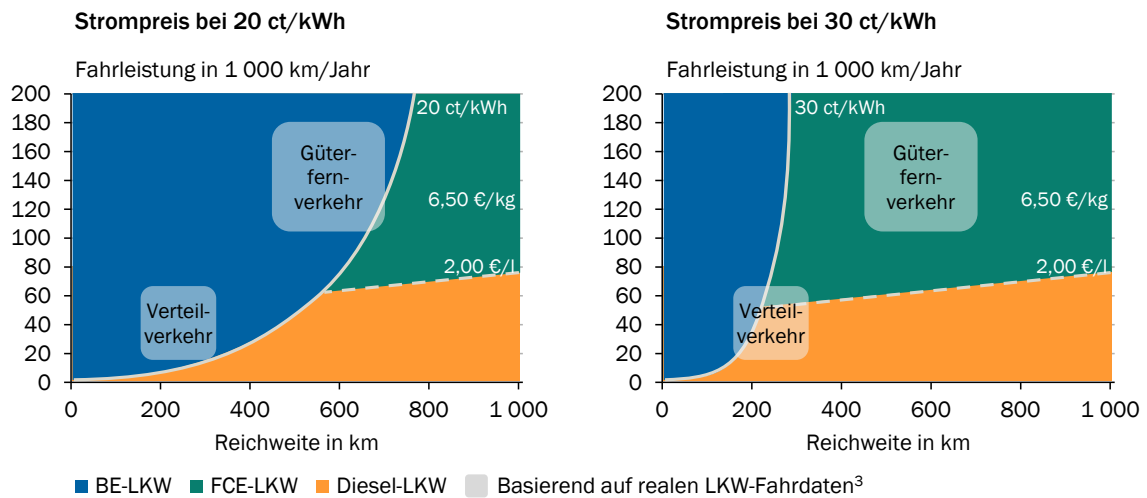
Die hier betrachtete Auswahl aktueller Studien legt nahe, dass insbesondere **für mittlere und schwere Lasten Mischungen unterschiedlicher Technologien erwartet werden** können und keinesfalls bereits eine klare Tendenz zu einer bestimmten Technologie – weder zur reinen Elektrifizierung, noch zur annähernd vollständigen Nutzung von Wasserstoff – im Schwerlastverkehr erkennbar ist.

Unsicherheit über zukünftige Rahmenbedingungen ernst nehmen

168. Der **Hochlauf der Batteriemobilität und der Hochlauf der Wasserstoffmobilität im Schwerlastverkehr** sehen sich beide **mit** ihren eigenen **zahlreichen Herausforderungen konfrontiert**. So wird für BE-LKW etwa eine flächendeckende Ladeinfrastruktur benötigt, weshalb das Stromnetz ausgebaut werden muss und – gerade entlang der Autobahnen – umfangreiche Flächen verfügbar gemacht werden müssen (Weiss et al., 2024; EWK, 2024; VM BW, 2024). Für die Wasserstoffmobilität ist zwar ein weniger dichtes Tankstellennetz nötig. Allerdings muss Wasserstoff – auch durch umfangreiche Importe (Bauer et al., 2023; EWK, 2024) – verfügbar gemacht und vor allem eine Einigung über die Betankungstechnologie erreicht werden (NOW, 2023a, S. 26).
169. Es ist heute nicht abschließend absehbar, in welchem Umfang sich der rein batterieelektrische Antrieb für LKW durchsetzen wird (acatech et al., 2023; Fraunhofer ISI et al., 2024; Plötz et al., 2022). Da ein großer Teil des Logistiksektors in hohem Maße kostenabhängig ist, werden dort die Gesamtbetriebskosten entscheidend sein. **Zentrale Einflussfaktoren**, die deren Entwicklung beeinflussen werden, sind die **Verfügbarkeit der Lade- bzw. Tankinfrastruktur**, die **Kosten des Netzausbaus**, die **Stromkosten**, die **Wasserstoffkosten**, die **Realisation von ausreichenden Wasserstoffimporten**, die Möglichkeiten der **Nachnutzung der Fahrzeuge** sowie die **Verfügbarkeit der Rohstoffe** für die verschiedenen Technologieoptionen. Für Anwendungsfelder mit hohem Energiebedarf und/oder dort, wo eine geringe Kostensensibilität vorliegt, etwa beim Schwerlastverkehr in abgelegenen Gebieten oder dem Transport von übergroßen und extrem schweren Gütern (beispielsweise von Rotorblättern für Windräder), wird Wasserstoff voraussichtlich eine Rolle spielen (Plötz et al., 2022).
170. Insbesondere mit Blick auf die Gesamtbetriebskosten besteht heute noch hohe Unsicherheit, ob FCE-LKW für lange Distanzen geringere Gesamtbetriebskosten aufweisen werden als BE-LKW. Dies ist unter anderem vom zukünftigen **Strompreis relativ zum Wasserstoffpreis** abhängig. ↘ ABBILDUNG 50 Im politischen Raum werden häufig die sinkenden Stromgestehungskosten erneuerbarer Energien angeführt, um zu argumentieren, dass Strom günstiger und somit die Elektromobilität attraktiver wird. **Berechnungen** hingegen, welche die durchschnittlichen Stromerzeugungskosten zur Befriedigung einer Nachfrage (Grimm et al., 2024) oder gar die zukünftigen Systemkosten (Ueckerdt et al., 2013; Hirth et al., 2015; Reichelstein und Sahoo, 2015; Shen et al., 2020; Simpson et al., 2020; Loth et al., 2022; Egerer et al., 2022) ermitteln, **deuten** in der Regel **nicht darauf hin**, dass **Strom deutlich günstiger wird** als derzeit.

ABBILDUNG 50

Energiekosten beeinflussen zukünftige¹ Wirtschaftlichkeit²



1 – Bei einem Marktpreis für Ladestrom von 20 bzw. 30 Cent je kWh, einem Diesel-Preis an der Tankstelle von 2 Euro je Liter und einem Wasserstoff-Kraftstoffpreis von 6,50 Euro je kg. 2 – Gesamtbetriebskosten basierend auf aktuellen Herstellkosten der Fahrzeugkomponenten (Brennstoffzelle 130 Euro je kW, Wasserstofftank 415 Euro je kg und Batteriepack 120 Euro je kWh) sowie Kosten für Betrieb und Instandhaltung basierend auf König et al. (2021). Gezeigt wird der Antrieb mit den jeweils niedrigsten Gesamtkosten. 3 – Die eingezeichneten Einsatzgebiete „Verteilverkehr“ und „Güterfernverkehr“ basieren auf realen LKW-Fahrdaten deutscher Flottenbetreiber nach Balke und Adenaw (2023).

Quellen: Balke und Adenaw (2023), Wolff et al. (2020), Wolff und Balke (2024), eigene Darstellung
 © Sachverständigenrat | 24-124-01

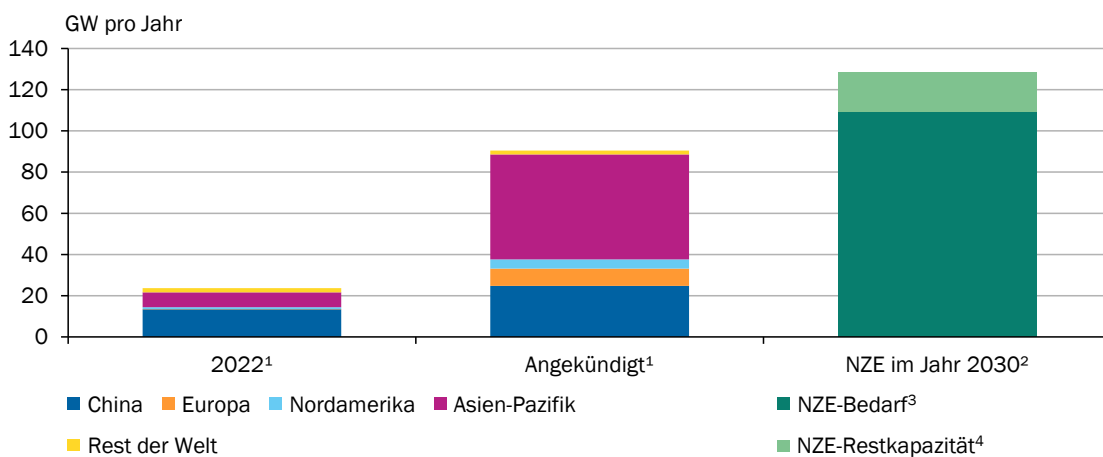
171. Die **Abschätzungen zukünftiger Gestehungskosten von grünem und blauem Wasserstoff** hängen von den **Kosten für Strom und Erdgas an den Produktionsstandorten des Wasserstoffs** sowie von den **Transportkosten** ab. An günstigen Standorten für erneuerbare Energien (Stromgestehungskosten von 20 bis 30 Euro/MWh) könnten im Jahr 2030 Wasserstoffkosten von 2 Euro/kg erreicht werden. Bei Stromkosten von über 100 Euro/MWh dürften die Vollkosten der Wasserstofferzeugung hingegen über 10 Euro/kg betragen (EWK, 2024, Abbildung 66 und Ziffer 256).
172. Für Deutschland lagen die aktuellen Vollkostenindikatoren (HydexPlus Green und HydexPlus Blue) in den vergangenen Monaten in der Bandbreite von 5,60 bis 8,70 Euro/kg, der Marktpreisindikator Hydrix der EEX schwankt aktuell um 7,50 Euro/kg mit leicht rückläufiger Tendenz. Die Kostenindikatoren von S&P/Platts für blauen Wasserstoff, wie auch die Preisindikatoren für grünen Wasserstoff aus Saudi-Arabien liegen bei etwa 3,50 Euro/kg (EWK, 2024, Abbildung 67 und Ziffer 257). Transportkosten dürften beim Handel großer Volumina im kommenden Jahrzehnt nur einen geringen Teil der Einstandskosten von Wasserstoff in Europa ausmachen (z. B. Runge et al., 2023). Es lassen sich aus den Kostenindikatoren zwar nicht unmittelbar Preiserwartungen ableiten, es wird jedoch deutlich, dass **Wasserstoffpreise erreichbar** sind, die **FCE-LKW zu einer attraktiven Option für die Schwermobilität werden lassen** können.

Der Weltmarkt für Antriebstechnologien ist entscheidend

173. Aus Sicht der Hersteller und mit Blick auf die Wertschöpfung in Deutschland und Europa ist nicht nur der zukünftige Antriebsmix in Deutschland von Bedeutung, sondern der Blick sollte sich auch auf **Exportmärkte für LKW mit verschiedenen Antriebsarten in Europa** ↘ ZIFFER 167 und **darüber hinaus** richten. Im Vergleich mit der Batterieentwicklung und -produktion ist Deutschland bei der Herstellung von Brennstoffzellen in einer besseren Wettbewerbsposition. Sowohl bei den Patentanmeldungen, als auch mit Blick auf die industriellen Akteure gehört Deutschland hinter den USA und Japan zu den führenden Staaten (Fraunhofer ISI, 2024). Um im kommenden Jahrzehnt eine **gute Wettbewerbsposition im Bereich der Brennstoffzellenproduktion wie auch als Anbieter von FCE-LKW und FCE-Nutzfahrzeugen** zu **erlangen**, dürfte die zeitnahe Skalierung der Brennstoffzellenproduktion im Bereich der Mobilitätsanwendungen und der Betrieb von signifikanten Fahrzeugzahlen in Europa notwendig sein.
174. Die Nationale Plattform für die Zukunft der Mobilität hat daher bereits im Jahr 2021 dringend empfohlen, die **Aktivitäten im Bereich der Brennstoffzellentechnologie auszubauen, da ansonsten** – wie schon bei der Batteriemobilität – die **Marktführerschaft an China verlorengehen dürfte** (NPM, 2021b). China hat zuletzt sein Engagement im Bereich der FCE-LKW verstärkt (IEA, 2023b; Mao et al., 2023) und hat heute einen Anteil von 95 % am weltweiten Bestand an FCE-LKW (IEA, 2023b). Dieser ist allerdings zahlenmäßig mit ca. 8 000 Fahrzeugen Mitte des Jahres 2023 noch gering. Die in Europa angekün-

↘ ABBILDUNG 51

Fertigungskapazitäten für mobile Brennstoffzellen nach Ländern/Regionen gemäß angekündigten Projekten und dem IEA-Netto-Null-Emissions-Szenario 2050
Für das Jahr 2022 und bis zum Jahr 2030



1 – Die Kapazitäten im Jahr 2022 und die angekündigten Kapazitäten beinhalten Materialtransportgeräte und andere Transportanwendungen. Angekündigte Kapazitäten schließen bestehende Kapazitäten ein. 2 – Netto-Null-Emissions-Szenario bis zum Jahr 2050. 3 – Die zur Deckung der prognostizierten Nachfrage im NZE-Szenario erforderliche Produktionskapazität (NZE-Nachfrage) wird unter der Annahme einer Auslastungsrate von 85 % geschätzt. Die NZE-Nachfrage nach Brennstoffzellen basiert ausschließlich auf Brennstoffzellenfahrzeugen. 4 – Die NZE-Restkapazität stellt die Produktionskapazität dar, die im Durchschnitt ungenutzt bliebe, was eine gewisse Flexibilität zur Anpassung an Nachfrageschwankungen bietet.

Quelle: IEA-Analyse auf der Grundlage von Daten von E4tech und Unternehmensankündigungen
© Sachverständigenrat | 24-128-01

digte Fertigungskapazität für Brennstoffzellen für Mobilitätsanwendungen bleiben heute deutlich hinter den in Asien angekündigten Kapazitäten zurück (IEA, 2023b; Fraunhofer ISI, 2024). ↘ ABBILDUNG 51

175. Eine **reine Forschungsförderung dürfte** in dieser Situation **nicht ausreichend** sein, wie von der Ratsmehrheit suggeriert. ↘ ZIFFER 68 Es ist vielmehr der **Aufbau einer Tankstelleninfrastruktur notwendig**, sodass eine signifikante Anzahl an Fahrzeugen betrieben werden kann. Die Vorgaben der AFIR (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union, 2023) zur Errichtung von Wasserstofftankstellen zeigen daher in die richtige Richtung. Der Vorschlag der Ratsmehrheit, Deutschland solle sich dafür einsetzen, dass die Anforderungen zum Ausbau der Wasserstofftankstellen-Infrastruktur im Rahmen der Evaluation und Überarbeitung der AFIR Ende des Jahres 2024 abgeschwächt werden, ↘ ZIFFER 159 ist nicht zielführend. Eine Strategie, bei der man zunächst vorwiegend auf BE-LKW setzt, bis klar wird, dass diese den schweren Güterfernverkehr nicht vollständig abdecken können (Vorschlag der Ratsmehrheit in ↘ ZIFFER 156), würde erneut Unsicherheiten generieren, die dazu führen dürften, dass europäische Hersteller an Wettbewerbsfähigkeit einbüßen. Werden dann zu einem späteren Zeitpunkt FCE-LKW im schweren Güterfernverkehr benötigt, so dürften aufgrund des fehlenden Angebots heimischer Hersteller asiatische oder US-amerikanische Hersteller zum Zug kommen. ↘ TABELLE 12
176. Die zehn weltweit größten LKW-Hersteller setzen heute bis auf eine Ausnahme bei Antrieben für schwere LKW auf mehrere Technologieoptionen. ↘ TABELLE 12 Die drei europäischen Hersteller unter ihnen, Daimler Truck, Traton und Volvo, sind weltweit aktiv. Die asiatischen Hersteller sind bisher vorwiegend auf den Märkten in Asien und Afrika vertreten, expandieren aber teilweise nach Europa und Südamerika. Es dürfte für europäische Hersteller schwieriger werden, signifikante

↘ TABELLE 12

Strategie und Marktgebiet der zehn größten LKW-Hersteller weltweit

Unternehmen	Hauptsitz	Strategie				Marktgebiete
		Batterie-elektrisch	Brennstoffzelle	Hybrid	PtG/PtL ¹	
Daimler Truck	Deutschland	X	X			Nordamerika, Europa, Asien
Dongfeng	China	X	X			China + X ²
FAW	China	X	X	X		China + X ²
Isuzu	Japan	X	X		X	Japan, Asien
Paccar	USA	X	X		X	Nordamerika, Europa
Shaanxi/Shacman	China	X	X	X		China, Osteuropa, Afrika
Sinotruk	China	X	X	X		China, Afrika, Südostasien
Tata	Indien	X	X		X	Indien
Traton	Deutschland	X				Europa, Nord- und Südamerika
Volvo	Schweden	X	X	X	X	Europa, Nordamerika

1 – Synthetische Kraftstoffe: Power-to-Gas (PtG) bzw. Power-to-Liquid (PtL). 2 – Möglicherweise weitere Marktgebiete.

Quellen: Daimler Truck (2024), Dongfeng Motor (2024), H2-Share (2024), Isuzu (2023), Paccar (2024a, 2024b), Shacman (2024a, 2024b), Sinotruk (2023, 2024), sohu (2024a, 2024b), Tata Motors (2023a, 2023b), Traton (2023, 2024), Volvo (2024), Yiyu (2021)
© Sachverständigenrat | 24-135-01

Marktanteile bei FCE-LKW im asiatischen Markt zu erreichen, wenn die Produktion und der Betrieb der FCE-LKW nicht zeitnah in Europa skaliert wird. Ein **zu starker Fokus auf die Erreichung der für das Jahr 2030 gesteckten Zwischenziele** mit der Konsequenz, dass die Konzentration aktuell vorrangig der Batteriemobilität gelten würde, wie von der Ratsmehrheit präferiert, ↘ ZIFFERN 67 F. UND 156 FF. **würde dazu führen, dass Deutschland im Bereich der Entwicklung von Brennstoffzellen** für Mobilitätsanwendungen technologisch, möglicherweise unwiederbringlich, **hinter die internationalen Wettbewerber zurückgeworfen** würde (NPM, 2021b).

Abhängigkeiten und Transformationsrisiken durch Diversifizierung reduzieren

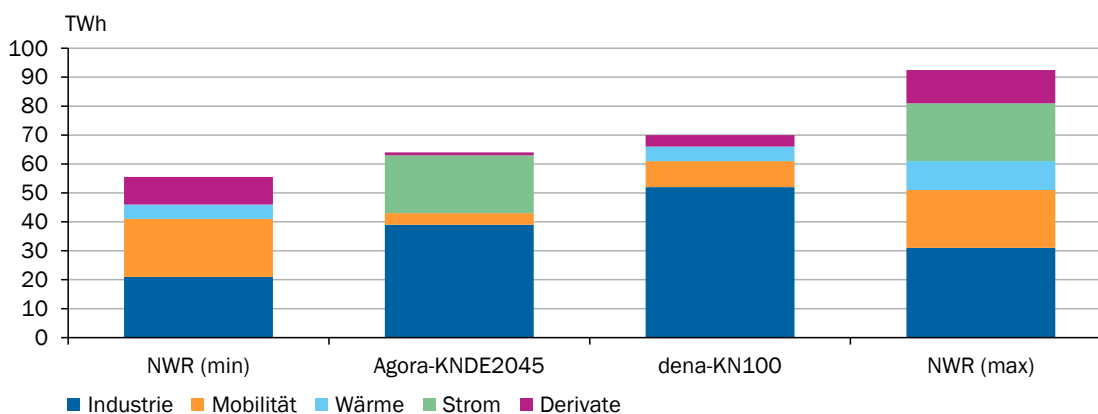
177. Eine breite technologische Basis in der Mobilität ist nicht zuletzt von Bedeutung, um **Abhängigkeiten** im Bereich der Energieversorgung **von einzelnen Technologien und Rohstoffen möglichst gering zu halten** und eine **Diversifizierung von Lieferbeziehungen für Vorprodukte zu ermöglichen**. Im Bereich der Energieversorgung ermöglicht eine breite technologische Basis in der Mobilität, auf stoffliche Energieträger (Wasserstoff, E-Fuels) auszuweichen, falls die vollständige Elektrifizierung des Güterverkehrs aufgrund von Hemmnissen beim Netzausbau oder eines schleppenden Ausbaus von zusätzlichen Erzeugungskapazitäten nicht umsetzbar ist. Sowohl für die Herstellung von Batterien als auch für die Herstellung von Brennstoffzellen werden zahlreiche – aber unterschiedliche – kritische Rohstoffe benötigt, die in Europa gar nicht oder nicht in ausreichender Menge heimisch verfügbar sind (NOW, 2020, 2023b). Darüber hinaus hängen der europäische Ausbau der Stromversorgung und der Netze sowie die Realisierbarkeit von Wasserstoffimporten davon ab, ob Rohstoffverfügbarkeiten gegeben sind und belastbare strategische Partnerschaften existieren.
178. Der Sachverständigenrat hat daher bereits in der Vergangenheit die Bedeutung von Handelsabkommen (etwa mit den Mercosur-Staaten oder Australien), insbesondere mit Blick auf die Verfügbarkeit kritischer Rohstoffe hervorgehoben (Grimm und von Räden, 2022a, 2022b; JG 2022). Setzt man auf mehrere Technologieoptionen für die Transformation des Verkehrssektors, so wäre es einfacher, **auf alternative Technologien auszuweichen, wenn sich bestimmte Lösungspfade unerwartet verschließen oder nicht wie geplant skalierbar sind**. Hemmnisse dieser Art sind angesichts der aktuellen weltpolitischen Lage nicht auszuschließen.

Synergien mit anderen Handlungsfeldern frühzeitig mitdenken

179. Das Ziel der Klimaneutralität im Jahr 2045 in Deutschland und im Jahr 2050 in der EU erfordert es, schon heute die Voraussetzungen dafür zu schaffen, im nächsten Jahrzehnt die umfassende Transformation im Verkehrssektor deutlich schneller als bisher voranbringen zu können. Angesichts der beschränkten Verfügbarkeit von Haushaltsmitteln gilt es zweifellos, diese zielgerichtet einzusetzen. Zugleich gilt es jedoch ebenso, **vorausschauende Entscheidungen zu treffen**, um ein **breites Spektrum an Technologien für die Transformation**

▸ ABBILDUNG 52

Prognostizierter Wasserstoffbedarf¹ im Jahr 2030 nach Sektoren in ausgewählten Systemstudien



1 – Der Wasserstoffbedarf für die Produktion von Derivaten wird vereinfacht mit 1,67 TWh H₂/TWh Derivat angenommen.

Quelle: EWK (2024) basierend auf Prognos et al. (2021), dena (2021) und NWR (2023d)

© Sachverständigenrat | 24-127-01

nutzbar zu machen und Exportmärkte der Zukunft zu erschließen. Denn nur eine starke zukünftige Wertschöpfungsbasis und eine größere Resilienz des (diversifizierten) Wirtschaftsmodells legen die Grundlage für Wachstum und zukünftige Steuereinnahmen.

180. Wasserstoff wird in der Industrie und für die Stromerzeugung schon im Jahr 2030 benötigt. Verschiedene jüngere Studien schätzen die Bedarfe in diesen Sektoren sowie in der Mobilität unterschiedlich ein. ▸ ABBILDUNG 52 **Im Zuge der Wasserstoffbeschaffung**, vor allem auch über Importe aus Regionen mit günstigen Bedingungen für die Erzeugung (EWK, 2024, Abschnitt 4.4.3; Runge et al., 2023; Bauer et al., 2023), **dürfte die Einbeziehung von Bedarfen für die Mobilität zu größeren Mengenszenarien führen.** Das kann einerseits eine Konkurrenz mit anderen Anwendungsfeldern begründen, was die Preise erhöhen könnte. Die größeren Mengen führen aber auch zu einer schnelleren Skalierung der Produktion, was die Kosten schneller sinken lässt. Zudem erlauben größere Volumina bei der Beschaffung eine bessere Diversifizierung der Importe, da mit mehreren Anbietern aus unterschiedlichen Regionen Verträge abgeschlossen werden können. Auch könnten sich Synergieeffekte beim Aufbau der Infrastrukturen ergeben. So empfiehlt der Nationale Wasserstoffrat, bei der Netzplanung die Wasserstoffbedarfe verschiedener Abnehmer, die Transformationspläne der Verteilnetzbetreiber und die kommunale Wärmeplanung integriert zu betrachten (NWR, 2023c).

Fazit: Fokus nicht zu eng setzen und technologiespezifisch Externalitäten adressieren

181. Die angeführten Argumente zeigen auf, warum die Mehrheitsposition zur Einordnung der Antriebstechnologien, ▸ ZIFFERN 140 FF. insbesondere auf Basis der Tabelle ▸ TABELLE 11 des Gutachtens zu kurz greift. Weder sind die dort aufgeführten Aspekte ausreichend, um eine Priorisierung abzuleiten, noch sollte die kurzfristige

Marktreife der Maßstab für eine solche Entscheidung sein. Zudem gehen die Einschätzungen in den einzelnen Zellen der Tabelle lediglich auf wenige Studien zurück, sodass hier nicht die Studienlage in ihrer Gesamtheit als Orientierungsrahmen, sondern Ergebnisse und Einschätzungen einzelner Studien als handlungsleitend interpretiert werden. Selbst wenn eine Mehrzahl der verfügbaren Studien sich auf die Vorteile von BE-LKW konzentrieren würde, sollte die aktuelle Marktreife der BE-LKW nicht zu stark in den Mittelpunkt der Handlungsempfehlungen gerückt werden. Im Gegenteil: **Die Berücksichtigung von allen Technologien, die bis zum Jahr 2045 eine tragende Rolle spielen** dürften – auch solcher, die sich noch in früheren Entwicklungsstadien befinden – **ist entscheidend für die Erreichung der Klimaziele und die europäische Wettbewerbsfähigkeit** in den entsprechenden Technologiesegmenten.

182. **Angesichts der Unsicherheiten** und fortwährend notwendigen Neubewertungen dürfte es von großer Bedeutung sein, **ein breites technologisches Spektrum mit hoher Ambition zu entwickeln**. Eine Fokussierung der öffentlichen Mittel auf die Unterstützung der batterieelektrischen Mobilität im Güterverkehr mit der Begründung, dass die Marktreife bereits erreicht sei, wie es im Haupttext positiv eingeordnet wird, ^{↘ ZIFFER 152} dürfte im Fall der Schwermobilität nicht zielführend sein. Dies würde den Weg zur Technologie- und Marktführerschaft bei Antriebstechnologien verbauen, die mittel- und langfristig eine entscheidende Rolle für die Dekarbonisierung der Mobilität spielen werden. Die **Vorgehensweise** der vom BMWK beauftragten **Langfristszenarien** (Fraunhofer ISI et al., 2024), **ein breites Spektrum an Optionen aufzuzeigen**, um die Optionen kontinuierlich im Blick zu behalten, **ist** vor diesem Hintergrund **zu begrüßen**.
183. Um Chancen für die Entwicklung und Skalierung verschiedener Mobilitätsoptionen im Güterverkehr zu eröffnen, gilt es, neben der CO₂-Bepreisung in netzgebundenen Sektoren, insbesondere **Netzwerkexternalitäten durch staatliche Maßnahmen zu internalisieren** (SG 2019 Ziffer 252; JG 2020 Ziffern 454ff.). Neben dem ambitionierten Strom- und Ladenetzausbau für die Batteriemobilität ist ein Wasserstofftransport- und -tankstellennetz notwendig, **um größere Pilot- und Demonstrationsprojekte zu ermöglichen** und dadurch schnell praktische Erfahrungen im Rahmen der Anwendungen zu sammeln. Insofern ist es zu begrüßen, dass gemäß der AFIR (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union, 2023) bis zum Jahr 2030 Wasserstofftankstellen, die sowohl Personenkraftwagen als auch schwere Nutzfahrzeuge versorgen können, in allen städtischen Knoten und alle 200 km entlang des TEN-V-Kernnetzes errichtet werden müssen (e-mobil BW, 2023).

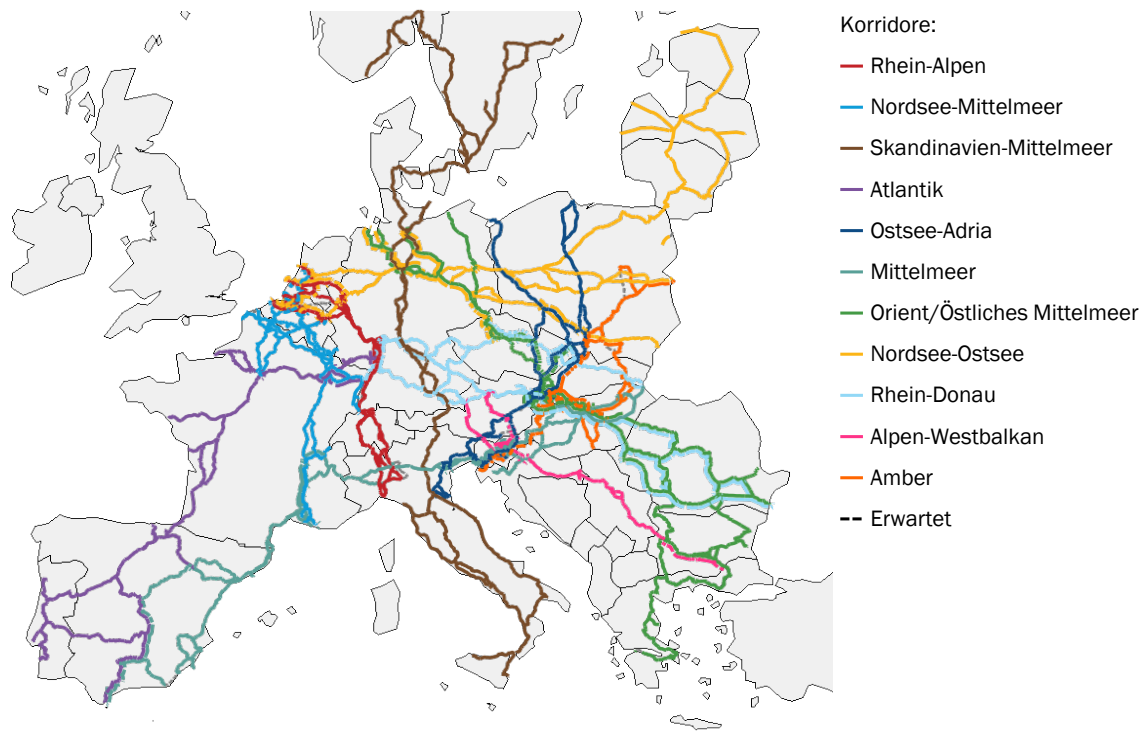
ANHANG

Europäischer Schienengüterverkehr

184. Die Grundlagen für einen europäischen Schienengüterverkehr wurden im Rahmen von **vier Eisenbahnpaketen mit Gesetzesvorhaben zur Harmonisierung im europäischen Eisenbahnraum** geschaffen (BMDV, 2021b). Trotz weitreichender regulatorischer Maßnahmen in den vergangenen Jahrzehnten bleiben **viele** historisch gewachsene **Inkompatibilitäten zwischen den nationalen Eisenbahnnetzen bestehen**. Technische Hindernisse bestehen in Form von Unterschieden in Gleisspurweiten, Strom- und Oberleitungssystemen, Radlasten sowie bei den Zugsicherungs- und Kommunikationssystemen. Auf betrieblicher Seite erfordern grenzüberschreitende Verbindungen eine ländereübergreifende Kooperation. **Bei der Übergabe von Zügen an der Grenze** kann es zu längeren **Verzögerungen** kommen (Stoll et al., 2017). Gründe sind unter anderem nationale netzspezifische Priorisierungen, Sprachanforderungen an die Triebfahrzeugführenden und tarifvertragliche Regelungen zu Arbeits- und Ruhezeiten. Zur Harmonisierung der technischen und betrieblichen Anforderungen bei Neu- und Ausbaumaßnahmen wurde bereits Anfang der 2000er-Jahre die Einführung der Technischen Spezifikation der Interoperabilität (TSI) beschlossen (Stoll et al., 2017).

▸ **ABBILDUNG 53**

Europäische Güterverkehrskorridore
Deutschland ist an sechs Korridoren beteiligt



Quellen: EuroGeographics bezüglich der Verwaltungsgrenzen, RailNetEurope
© Sachverständigenrat | 24-097-01

185. **Zur Förderung des transeuropäischen Schienengüterverkehrs** wird ein **Netz von elf Kernkorridoren** ausgebaut. [↪ ABBILDUNG 53](#) Dieses überschneidet sich weitgehend mit den Korridoren des Transeuropäischen Verkehrsnetzes (TEN-V). Die Infrastrukturbetreiber dieser Korridore sind verpflichtet, enger als bisher zusammenzuarbeiten und grenzüberschreitende Trassen anzubieten. Die Entscheidungsbefugnis eines jeden Korridors wurde in sogenannten One-Stop Shops (OSS) gebündelt. Dadurch sollen Prozesse vereinfacht und für die Endnutzer eine einheitliche Anlaufstelle eingerichtet werden (BMDV, 2021b). Die **Anrainerstaaten** haben sich entsprechend der EU-Verordnung zum Aufbau des TEN-V-Netzes (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union, 2013) **verpflichtet, die Korridore vollständig zu elektrifizieren und mit dem European Rail Traffic Management System (ERTMS) auszustatten** (Stoll et al., 2017). Teil des Systems soll sein, ein einheitliches europäisches Eisenbahnverkehrsleitsystem (European Train Control System, ETCS) einzuführen, das einen aufwendigen Zugwagenaustausch beim Grenzübertritt obsolet macht.
186. Sechs der geplanten Kernkorridore verlaufen durch Deutschland. [↪ ABBILDUNG 53](#) Der Ausbau des Netzes umfasst mehrere Großprojekte. **Während die EU-Nachbarn diese ehrgeizig voranbringen, hinkt Deutschland hinterher.** Der 64 km lange Brennerbasistunnel als Teil des Skandinavien-Mittelmeer-Korridors könnte den alpendurchquerenden Güterverkehr zwischen Österreich und Italien ab dem Jahr 2032 deutlich entlasten. **Mit dem vierspurigen Ausbau der Schienenanbindung aus deutscher Richtung, dem Brennernordzulauf, ist jedoch erst in etwa 20 Jahren zu rechnen** (DB InfraGO und ÖBB Infra, 2024). Ähnlich steht es um den Anschluss an den Schweizer Teil des TEN-V-Rhein-Alpen-Korridors. Die Schweiz hat zwischen den Jahren 2007 und 2020 drei Eisenbahntunnel (Lötschberg-, Gotthard-, und Ceneri-Basistunnel) von insgesamt 107 km Länge fertiggestellt (EDA, 2020). Der nördliche Zubringer aus Deutschland wird erst im Jahr 2035 vierspurig ausgebaut sein (DB, 2024e).

Hintergrund zu Berechnungen des Strombedarfs für die Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs

187. In einem Szenario, in dem der **gesamte Straßengüterverkehr** im Jahr 2045 **batterieelektrisch betrieben** wird, würde sich der Stromverbrauch direkt aus dem aktuellen Endenergieverbrauch ergeben. Aktuell liegt dieser bei ca. 640 Petajoule (PJ), also etwa 177,7 Terrawattstunden (TWh) (Statistisches Bundesamt, 2022, Tabelle 1.2.1.). Da batteriebetriebene Nutzfahrzeuge jedoch einen höheren Wirkungsgrad aufweisen als konventionelle LKW mit Dieselmotor – bei Diesel-LKW liegt der Effizienzfaktor bei ca. 0,45, beim Elektroantrieb bei ca. 0,8 (Ekberg et al., 2021) –, kann der Endenergieverbrauch mit dem Faktor $(0,45/0,8) = (1/1,77)$ nach unten korrigiert werden, was einem **Bruttostromverbrauch des Straßengüterverkehrs von ca. 100 TWh** entsprechen würde.

Um den zu erwartenden zukünftigen Stromverbrauch abzubilden, muss diese Zahl **um die Wachstumsrate des Straßengüterverkehrs sowie um einen möglichen Anteil alternativer Antriebsarten zum BE-LKW korrigiert** werden. Diese zwei Werte können zurzeit nur mit Unsicherheit prognostiziert

werden. Für das Jahr 2045 schwanken die in verschiedenen Prognosen genannten Wachstumsraten des Straßengüterverkehrs zwischen 30 % und 70 %. [↪ ZIFFER 76](#) Zudem könnten Teile des Straßengüterverkehrs künftig durch alternative emissionsarme Antriebe betrieben werden. Würde der BE-LKW im klimaneutralen Straßengüterverkehr lediglich einen Anteil von 80 % ausmachen, ergäbe sich insgesamt eine Bandbreite von möglichen Bruttostromverbräuchen von ca. 104 bis 136 TWh.

188. Für die Stromsysteme ist neben der gesamten benötigten Strommenge auch die **Verteilung des Strombedarfs über die Zeit** relevant, insbesondere die Fluktuation des Ladebedarfs im Tagesverlauf. Beim zeitlich hochkonzentrierten Laden braucht es viel mehr Stromerzeugungs- und Netzkapazitäten, als wenn der Bedarf über die Zeit verteilt ist. Würden beispielsweise alle LKW jeden Tag für eine Stunde lang zur gleichen Uhrzeit laden, bräuhete es bei einem jährlichen Verbrauch von 1 000 TWh ca. 273 GW Erzeugungskapazitäten, die für LKW-Strom verfügbar sein müssten. Ein solch konzentriertes Laden ist aber nicht zu erwarten. Vielmehr dürfte ein großer Teil der Ladevorgänge im betrieblichen Depot oder während der gesetzlich vorgeschriebenen Fahrtunterbrechungen stattfinden.

[↪ ZIFFERN 116 FF.](#) [↪ KASTEN 16](#)

189. Die **Obergrenze dafür, wie konzentriert das Laden sein wird** und wie sehr es die Stromsysteme belastet, wird daher voraussichtlich **durch den Bedarf für die öffentliche Ladeinfrastruktur**, insbesondere für Megacharger, definiert. Unter der Annahme, dass diese Ladeform 25 % des Ladebedarfs [↪ ZIFFER 116](#) – ca. 25 TWh – abdecken wird, verlangt sie eine verfügbare Erzeugungskapazität von zwischen 2,85 GW (wenn das Laden gleichmäßig über den Tag verteilt ist) und 22,9 GW (wenn das Laden immer innerhalb von drei Stunden am Tag erfolgt). Wie viel Zubau an zusätzlicher Erzeugungskapazität dies erfordert, hängt davon ab, ob sich die Ladezeiten mit hoher Residuallast überschneiden, d. h. mit den Zeiten, in denen eine relativ hohe Nachfrage im Vergleich zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien herrscht. Hohe Residuallast wird voraussichtlich in den Morgen- und Abendstunden (Agora Energiewende et al., 2023) anfallen, also tendenziell nicht in den Zeiten, in denen BE-LKW geladen werden (Daimler Truck und TenneT TSO, 2022). Daher kann davon ausgegangen werden, dass, je nach Ladeverhalten beim öffentlichen Laden, ca. 2,85 bis 10 GW an zusätzlicher, zeitgerecht produzierter Erzeugungskapazität benötigt werden.

Hintergrund zur Berechnung des Internalisierungsgrads im Straßengüterverkehr im Jahr 2024

190. Die Europäische Kommission berücksichtigt bei ihrer Berechnung des Internalisierungsgrads für das Jahr 2016 die LKW-Maut und die Energiesteuer auf Diesel. Die **LKW-Maut wurde seither mehrfach reformiert**. Insbesondere wurde im Dezember 2023 ein Mautanteil für CO₂-Emissionen eingeführt. [↪ ZIFFER 87](#) Zusätzlich wird seit dem Jahr 2021 ein **CO₂-Preis auf Dieselkraftstoff** erhoben. Um zu **quantifizieren**, wie sich diese regulatorischen Änderungen auf den **Internalisierungsgrad im Straßengüterverkehr** ausgewirkt haben, hat der Sachverständigenrat eine Analyse durchgeführt. Im Folgenden werden die Annahmen zur Ermittlung der Steuern und Gebühren im Jahr 2024 erläutert. Die

externen Kostensätze aus dem Jahr 2016 werden mit der Inflationsrate fortgeschrieben.

191. Zunächst wird der Anteil der **LKW-Maut und der Steuern an den gesamten** von der Europäischen Kommission **für das Jahr 2016** ermittelten **marginalen Steuern und Gebühren geschätzt**. Nach eigenen Angaben betragen im Jahr 2016 die Energiesteuern etwa 9,5 Euro pro 1 000 tkm, und die Mautgebühren 4,5 Euro pro 1 000 km (Europäische Kommission, 2019b, S. 77). Das entspricht einem Verhältnis von 2:1. Da die Maut je gefahrenem km erhoben wird, fallen die relativen Mautkosten je tkm für LKW mit geringerem Gewicht höher aus als für schwerere LKW. Darauf basierend lässt sich ermitteln, dass das Verhältnis von Mautanteil/Steueranteil für kleine LKW (7,5 bis 16 Tonnen) 40/60, für mittlere LKW (16 bis 32 Tonnen) 30/70 und für große LKW (mehr als 32 Tonnen) 20/80 beträgt. Die tatsächlichen Kostenanteile könnten höher oder geringer ausfallen.
192. Bei der **Abschätzung des Anstiegs der Mautgebühren** seit dem Jahr 2016 ist zu beachten, dass die Fahrzeugklassen in den Mauttarifen von den Fahrzeugklassen der Europäischen Kommission abweichen. Zudem haben sich die Fahrzeugklassen in den für 2016 und 2024 geltenden Mauttarifen geändert. Für das Jahr 2016 wird für kleine LKW der Mautsatz für LKW mit zwei Achsen, für mittlere LKW der Mautsatz für LKW mit drei Achsen und für große LKW der Mautsatz für LKW mit vier Achsen zugrunde gelegt. Für das Jahr 2024 wird für kleine LKW der Mittelwert der Mautsätze für LKW mit 7,5 bis 12 t und LKW mit 12 bis 18 t, für mittlere LKW der Mautsatz für LKW mit bis zu drei Achsen und mehr als 18 t und für große LKW der Mautsatz mit bis zu vier Achsen und mehr als 18 t zugrunde gelegt. Innerhalb der einzelnen Gewichtsklassen werden die Mauttarife nach den Euro-Schadstoffklassen I bis VI differenziert. Zudem wird innerhalb der Euro-Schadstoffklasse VI nach CO₂-Klassen (1 bis 5) unterschieden. Die CO₂-Klasse 5 gilt für emissionsfreie LKW. Diese werden in der Berechnung nicht berücksichtigt.

Für jeden Fahrzeugtyp (unterschieden nach Gewichts- und Achsenklassen, Euro-Schadstoffklasse und CO₂-Klassen) **wird der Anstieg des Mautsatzes ermittelt**. Daraus wird für jede Fahrzeugklasse (klein/mittel/groß) der Mittelwert gebildet. So ergibt sich für kleine LKW ein Anstieg der Mautkosten von 124 %, für mittlere LKW ein Anstieg von 152 % und für große LKW ein Anstieg von 158 %. Dabei wird die stark vereinfachende Annahme getroffen, dass innerhalb jeder Gewichtsklasse eine Gleichverteilung über die verschiedenen CO₂-Schadstoff-Klassen-Kombinationen vorliegt. Es wäre jedoch auch plausibel anzunehmen, dass der Anteil der LKW der Euro-Schadstoffklasse VI stetig steigt.

193. Die **Einführung des nationalen CO₂-Preises** wirkt sich linear auf alle Fahrzeugklassen aus. Der CO₂-Preis kann als Mengensteuer pro Liter Diesel interpretiert werden. Die Energiesteuer auf einen Liter Diesel beträgt in den Jahren 2016 und 2024 jeweils 47,04 Cent (§ 2 Abs. 1 Satz 4b Energiesteuergesetz). Der CO₂-Preis pro Liter Diesel beträgt im Jahr 2024 ca. 14,4 Cent (Bundesregierung, 2024). Dies ergibt einen **Anstieg der Steuerlast um etwa 31 %**.
194. **Insgesamt stiegen die Steuern und Gebühren durch diese Änderungen** nach der hier dargestellten Berechnung für die kleinen LKW um 5,2 Cent, für die

mittleren LKW um 3,1 Cent und für die schweren LKW um 2,2 Cent je tkm an. Daraus ergeben sich **Internalisierungssätze von 42 % für kleine LKW, 37 % für mittlere LKW und 33 % für große LKW.**

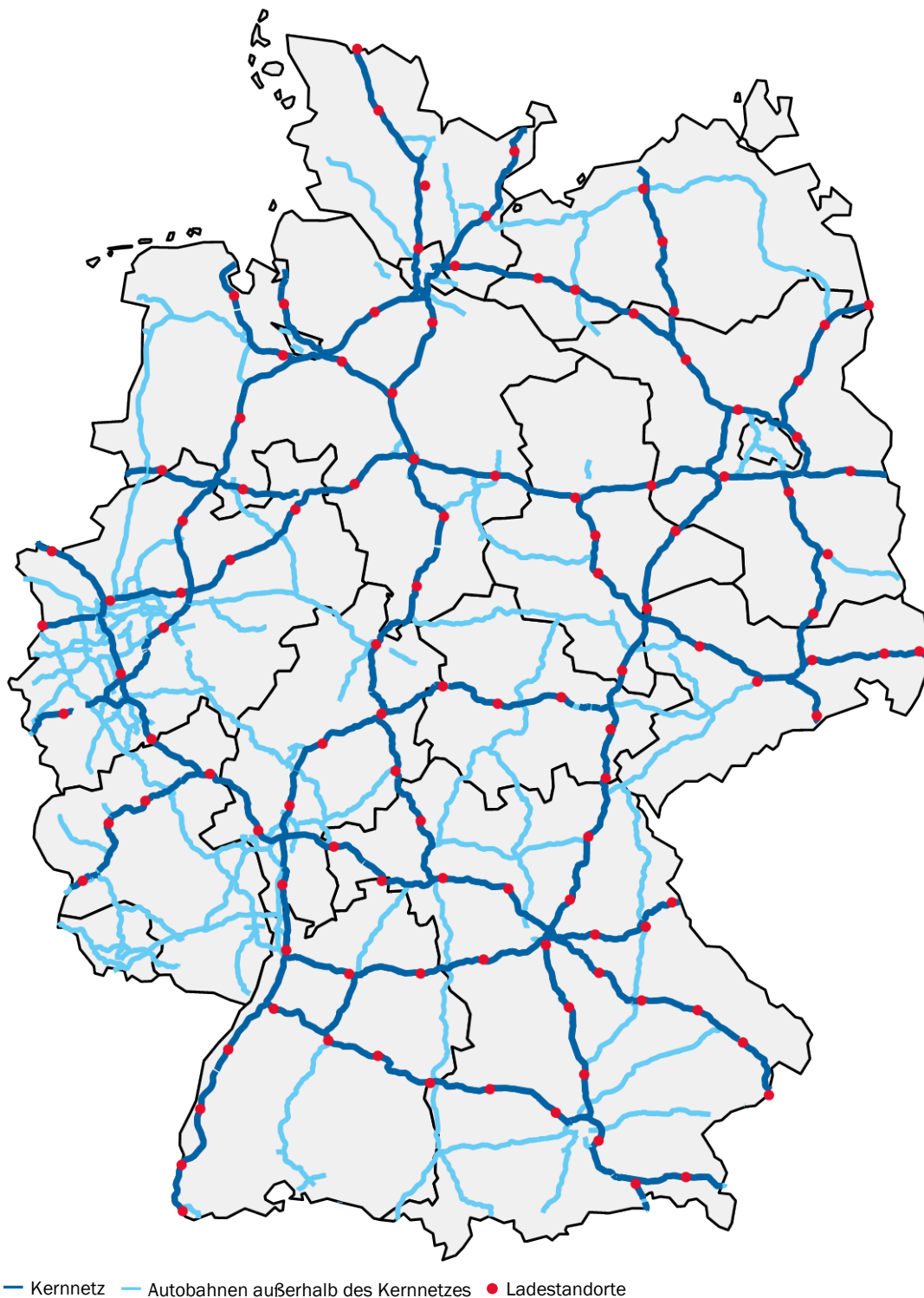
Langfristige Optionen zur Steigerung der Kapazität im Schienengüterverkehr

195. **Um die Kapazität auf der Schiene zu erhöhen**, bieten sich weitere technische Möglichkeiten an, die die **Mindestzugfolgezeiten** reduzieren können, also die Zeit, die vergehen muss, bis nach Durchfahrt eines Zuges durch einen Streckenabschnitt (Blockabschnitt) der Folgezug einfahren kann. Es wird erwartet, dass **Digitalisierungskonzepte** unter Nutzung neuer Querschnittstechnologien wie Künstlicher Intelligenz **helfen können, die Schienenkapazität zu erhöhen** (DB, 2024f, 2024g). Zukünftig könnte die verstärkte Nutzung von KI die Trassenbelegung auch in Echtzeit und im Verkehr selbst optimieren. Allerdings sind bislang nur geringe Anteile des Schienennetzes für andere digitalisierte Lösungen vorbereitet. So waren z. B. zu Beginn des Jahres 2023 lediglich 520 km des über 33 000 km langen Netzes der DB Netz AG mit dem europäischen Zugbeeinflussungssystem (ETCS) ausgestattet (Bundesregierung, 2023e). Um größere Anteile des Streckennetzes, insbesondere die Hochleistungskorridore, für digitale Leitsysteme vorzubereiten, müssten erhebliche Investitionen getätigt werden.
196. In der Diskussion ist auch die **bessere Auslastung von Schnellfahrstrecken durch Belegung mit dem Schienengüterverkehr** (Bundesregierung, 2023e). Vor allem nachts, wenn wenig bis gar keine ICE auf den Strecken unterwegs sind, können sie auf manchen Strecken für Güterzüge freigegeben werden. Es mangelt allerdings noch an technischen Voraussetzungen in den Triebwagen des Schienengüterverkehrs, um die Schnellfahrstrecken zu befahren. Für solche Kapazitätserweiterungen sind daher weitere Investitionen in die Züge erforderlich. [↘ ZIFFER 132](#)
197. **In der langen Frist** sind weitere **Konzepte denkbar**, die die Flexibilität und Geschwindigkeit im Schienengüterverkehr erheblich verbessern könnten. Da die Pünktlichkeit und Geschwindigkeit des Schienengüterverkehrs nicht nur durch die Zeit und den Personalaufwand bei der Zugzusammenstellung beeinflusst wird, [↘ ZIFFER 132](#) sondern auch durch die notwendigen Personalwechsel, [↘ ZIFFER 133](#) könnten automatisierte, **autonom fahrende Züge** dieser Problematik begegnen. Die DB Cargo AG, die Digitale Schiene Deutschland (DSD), das Deutsche Luft- und Raumfahrtzentrum (DLR) sowie der niederländische Infrastrukturbetreiber Pro-Rail B.V. erproben gegenwärtig bereits automatisiert fahrende Güterzüge auf der Betuweroute zwischen dem Hafen Rotterdam und dem Ruhrgebiet (DB, 2021; EBA, 2021). Das Erprobungsprojekt hat eine Laufzeit bis zum Jahr 2025 und soll unter anderem die technisch-betriebliche Anwendungsreife der ATO-Technologie nachweisen. Noch beschränkt sich die Erprobung auf den niederländischen Abschnitt der Strecke, der dem Güterverkehr vorbehalten ist (24Rhein, 2021). Denkbar ist, die Erprobungen auf andere Strecken auszuweiten, wobei diese technisch ertüchtigt werden müssen.

198. **Damit auch Potenziale für den Schienengüterverkehr auf kürzeren Strecken genutzt werden** können, ist der **Aufbau intermodaler Hubs** zielführend, auch wenn Deutschland im europäischen Vergleich bereits über vergleichsweise viele solcher Umschlagplätze verfügt (ECA, 2023). Umschlagprozesse können durch den **Einsatz digitaler Lösungen**, wie verbesserte Dokumentenübergaben und Frachtverfolgungssysteme, effizienter organisiert werden (Bergstrand, 2020). **Gleisanschlüsse bei Unternehmen** können zudem die Transportwege der ersten und letzten Meile mittels LKW verkürzen (Die Güterbahnen, 2023; VCI, 2024). Der Aufbau und Unterhalt solcher intermodaler Hubs ist sowohl im alleinigen Betrieb durch die DB AG als Infrastrukturbetreiber, unternehmerisch durch Großunternehmen oder Logistikkonzerne oder in partnerschaftlichen Gesellschaften zwischen der DB AG und Unternehmen möglich. Für den Ausbau des Schienennetzes für Gleisanschlüsse liegt die Finanzierungsverpflichtung in der Regel bei den Unternehmen, die die Gleisanschlüsse in Auftrag geben, während der Bau durch die DB AG getätigt wird.

▸ ABBILDUNG 54

AFIR-konformes Ladenetz entlang des TEN-V-Kernetzes¹



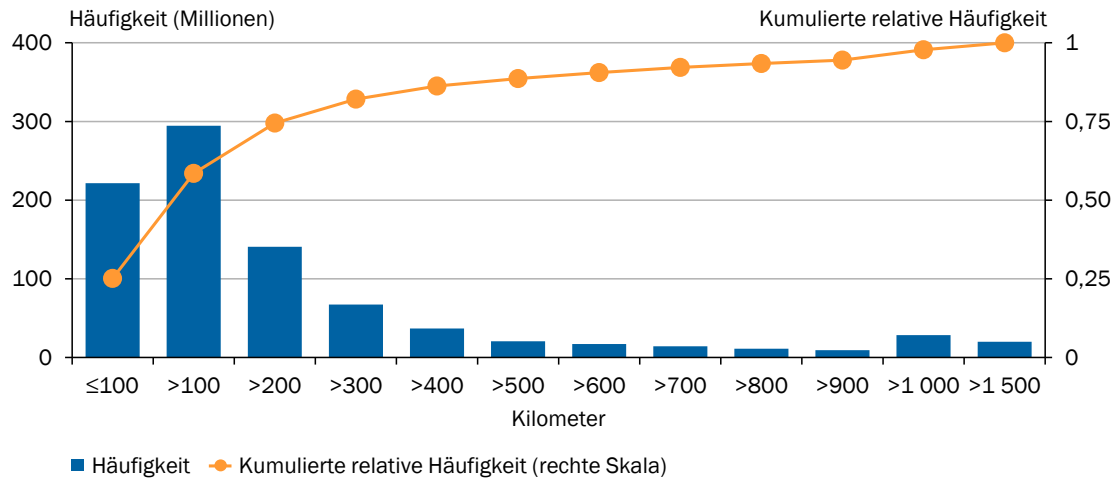
1 – Die Karte zeigt eine mögliche Umsetzung der europäischen Anforderungen der Verordnung zum Aufbau einer Infrastruktur für alternative Kraftstoffe (AFIR) entlang des transeuropäischen Verkehrsnetzes (TEN-V-Kernetz) zum Jahr 2030 in Deutschland. Inkludiert sind bestehende Autobahnen, die derzeit für das TEN-V-Kernetz aufgewertet werden (z. B. A1), exkludiert sind bisher ungebaute Autobahnen.

Quellen: Balke et al. (2024a), eigene Darstellung
© Sachverständigenrat | 24-115-01

▾ ABBILDUNG 55

Verteilung der Streckenlängen von LKW-Fahrten in der EU im Jahr 2030¹

75 % der europäischen LKW-Transporte mit Distanzen unter 300 km



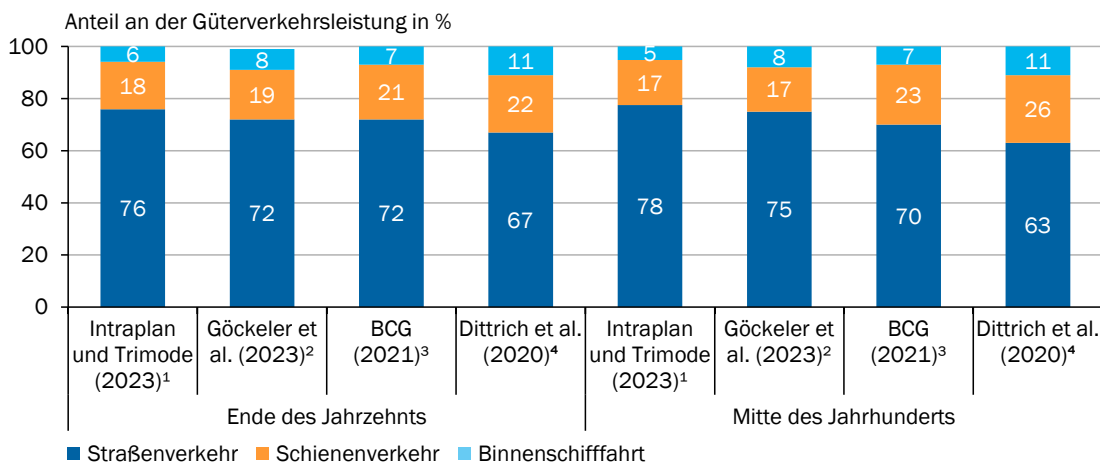
1 – Prognose für das Jahr 2030 auf Grundlage der durchschnittlichen Wachstumsraten des LKW-Güterverkehrs für die Jahre 2010 bis 2019.

Quelle: Speth et al. (2022) auf Basis des ETISplus-Datensatzes
© Sachverständigenrat | 24-098-01

▾ ABBILDUNG 56

Prognosen zum zukünftigen Modal Split im Güterverkehr

LKW auch im klimaneutralen Güterverkehr wichtigstes Transportmittel



1 – Werte für die Jahre 2036 und 2051. 2 – Werte für die Jahre 2030 und 2045. Abweichung von 100 Prozent, weil im Szenario weitere Verkehrsträger berücksichtigt wurden. 3 – Werte für die Jahre 2030 und 2045. 4 – Werte für die Jahre 2030 und 2050; Szenario GreenEe2.

Quellen: BCG (2021), Dittrich et al. (2020), Göckeler et al. (2023), Intraplan und Trimode (2023)
© Sachverständigenrat | 24-031-01

↳ TABELLE 13

Verkehrsmittel im Güterverkehr unterscheiden sich stark in ihrer Emissionsintensität¹

Verkehrsmittel	Treibhausgase ⁴	Stickoxide	Partikel ⁵
	Gramm pro Tonnenkilometer ⁶		
Lastkraftwagen (LKW)²	121	0,198	0,010
davon:			
LKW von 3,5 bis 7,5 Tonnen	569	1,775	0,068
LKW von 7,5 bis 12 Tonnen	398	1,115	0,041
LKW über 12 Tonnen	253	0,604	0,022
Last- und Sattelzüge	103	0,139	0,008
Güterbahnen³	16	0,032	0,001
davon:			
Dieseltraktion	28	0,242	0,007
Elektrotraktion	15	0,018	0,001
Binnenschiffe	36	0,415	0,011

1 – Durchschnittliche Emissionen einzelner Verkehrsmittel im Güterverkehr in Deutschland im Jahr 2022. 2 – LKW mit einem zulässigen Gesamtgewicht ab 3,5 Tonnen sowie Sattelzüge und Lastzüge. 3 – Die in der Tabelle ausgewiesenen Emissionsfaktoren für die Bahn basieren auf Angaben zum durchschnittlichen Strom-Mix in Deutschland. Emissionsfaktoren, die auf unternehmens- oder sektorbezogenen Strombezügen basieren, können daher von den in der Tabelle dargestellten Werten abweichen. 4 – CO₂, CH₄ und N₂O angegeben in CO₂-Äquivalenten gemäß AR5 (5. Sachstandsbericht des IPCC). 5 – Partikelemissionen von Fahrzeugen stammen zum Teil aus dem Auspuff, z. B. Rußpartikel. Darüber hinaus entsteht Feinstaub durch den Verschleiß von Bremsen und Reifen. Hier ohne Abrieb von Bremsen, Oberleitungen, Reifen und Straßenbelag. 6 – Einschließlich der Emissionen aus der Bereitstellung und Umwandlung der Energieträger in Strom, Diesel, Flüssig- und Erdgas.

Quelle: Umweltbundesamt

© Sachverständigenrat | 24-027-01

LITERATUR

24Rhein (2021), Deutsche Bahn: Erste Züge auf Rotterdam-Ruhrgebiet-Route fahren bald ferngesteuert, <https://www.24rhein.de/leben-im-westen/verkehr/deutsche-bahn-zuege-automatisch-rotterdam-betuweroute-niederlande-ruhrgebiet-91033081.html>, abgerufen am 19.3.2024.

acatech und **DECHEMA** (2022), Wasserstoff im Mobilitätssektor, Deutsche Akademie der Technikwissenschaften / Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie, Berlin.

acatech, **Leopoldina**, und **Akademienunion** (2023), Wie wird Deutschland klimaneutral? Handlungsoptionen für Technologieumbau, Verbrauchsreduktion und Kohlenstoffmanagement, Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung, Stellungnahme, Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, Union der deutschen Akademien der Wissenschaften, Berlin.

ACEA (2024), New commercial vehicle registrations: vans +14.6%, trucks +16.3%, buses +19.4% in 2023, Pressemitteilung, European Automobile Manufacturers' Association, Brüssel, 26. Januar.

ACER (2023), Report on electricity transmission and distribution tariff methodologies in Europe, European Union Agency for the Cooperation of Energy Regulators, Ljubljana.

Ademmer, M., N. Jannsen, S. Kooths und S. Möhle (2019), Niedrigwasser bremsst Produktion, Wirtschaftsdienst 99 (1), 79–80.

Ademmer, M., N. Jannsen und S. Meuchelböck (2023), Extreme weather events and economic activity: The case of low water levels on the Rhine river, German Economic Review 24 (2), 121–144.

Agora Energiewende, **Prognos**, und **Consentec** (2023), Klimaneutrales Stromsystem 2035: Wie der deutsche Stromsektor bis zum Jahr 2035 klimaneutral werden kann, Studie, Version 1.3, April 2023, Berlin.

Agora Verkehrswende (2024), E-Lkw im Fernverkehr – von öffentlichen Schnellladepunkten und ausweichend Stellplätzen, Webinar-Präsentation vom 12. März 2024, Berlin.

Agora Verkehrswende (2022), PKW-Maut für die Mobilitätswende: Eine verursachergerechte Straßennutzungsgebühr als Baustein für ein digitalisiertes und klimaneutrales Verkehrssystem, Studie, Agora Verkehrswende mit INFRAS, Berlin.

Ahluwalia, R.K., X. Wang, D.D. Papadias und A.G. Star (2022), Performance and total cost of ownership of a fuel cell hybrid mining truck, Energies 16 (1), 286.

Albatayneh, A., A. Juaidi, M. Jaradat und F. Manzano-Agugliaro (2023), Future of electric and hydrogen cars and trucks: An overview, Energies 16 (7), 3230.

Allianz pro Schiene (2024), Elektromobilität: Die Mobilität von morgen schon heute auf der Schiene, <https://www.allianz-pro-schiene.de/themen/umwelt/elektromobilitaet/>, abgerufen am 26.3.2024.

Alonso-Villar, A., B. Davíðsdóttir, H. Stefánsson, E.I. Ásgeirsson und R. Kristjánsson (2023), Electrification potential for heavy-duty vehicles in harsh climate conditions: A case study based technical feasibility assessment, Journal of Cleaner Production 417, 137997.

Andreae, K. (2024), Standpunkt: Wir brauchen keine neuen Förderprogramme für Ladesäulen, Tagespiegel Background Verkehr & Smart Mobility, Berlin, 18. Januar.

Arit, W., A. Galster, G.-F. Witthus und H. Köpplinger (2023), Notwendige Forschungen und Entwicklungen zur Erschließung einer effizienten Energieversorgung mit Wasserstoff-Technologien, Wasserstoff gegen den Klimawandel, München, 14–17.

Arndt, W.-H. und S. Schneider (2023), Investitionsbedarfe für ein nachhaltiges Verkehrssystem – Schwerpunkt kommunale Netze, Difu Impulse 7/2023, Deutsches Institut für Urbanistik, Berlin.

Aryanpur, V. und F. Rogan (2024), Decarbonising road freight transport: The role of zero-emission trucks and intangible costs, Scientific Reports 14 (1), 2113.

Auer, J., S. Link und P. Plötz (2023), Public charging locations for battery electric trucks: A GIS-based statistical analysis using real-world truck stop data for Germany, Working Paper Sustainability and Innovation S 04/2023, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe.

Autobahn GmbH (2024), Projekt: A45: Ersatzneubau Talbrücke Rahmede, <https://www.autobahn.de/die-autobahn/projekte/detail/ersatzneubau-talbruecke-rahmede>, abgerufen am 22.3.2024.

Automobilwoche (2024), Shell schließt weitere Wasserstoff-Tankstellen, <https://www.automobilwoche.de/bc-online/der-energiekonzern-shell-schliesst-dauerhaft-alle-seine-wasserstoff-tankstellen>, abgerufen am 14.2.2024.

Azar, C. und B.A. Sandén (2011), The elusive quest for technology-neutral policies, *Environmental Innovation and Societal Transitions* 1 (1), 135–139.

Backhaus, R. (2021), Battery raw materials – Where from and where to?, *ATZ worldwide* 123 (9), 8–13.

BAFA (2023), Merkblatt für Schienenbahnen 2023, Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, Eschborn.

Baldwin, R.E. (2022), The peak globalisation myth: Part 3 – How global supply chains are unwinding, <https://cepr.org/voxeu/columns/peak-globalisation-myth-part-3-how-global-supply-chains-are-unwinding>, abgerufen am 11.2.2024.

Baldwin, R.E. und F. Robert-Nicoud (2007), Entry and asymmetric lobbying: Why governments pick losers, *Journal of the European Economic Association* 5 (5), 1064–1093.

Balke, G. und L. Adenaw (2023), Heavy commercial vehicles' mobility: Dataset of trucks' anonymized recorded driving and operation (DT-CARGO), Data in Brief 48, 109246.

Balke, G., M. Zähringer, A. Paper und M. Lienkamp (2024a), Navigating the change: Constrained optimization and ramp-up strategy of a charging network for battery electric heavy trucks, 27th IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems, mimeo.

Balke, G., M. Zähringer, J. Schneider und M. Lienkamp (2024b), Connecting the dots: A comprehensive modeling and evaluation approach to assess the performance and robustness of charging networks for battery electric trucks and its application to Germany, *World Electric Vehicle Journal* 15 (1), 32.

Basma, H., A. Saboori und F. Rodríguez (2021), Total cost of ownership for tractor-trailers in Europe battery electric versus diesel, White Paper, International Council on Clean Transportation, Washington, DC.

Basma, H., Y. Zhou und F. Rodríguez (2022), Fuel-cell hydrogen long-haul trucks in Europe: A total cost of ownership analysis, ICCT White Paper, International Council on Clean Transportation, Berlin.

BaST (2019), Lkw-Parksituation im Umfeld der BAB 2018, Bundesweite Erhebung der Lkw-Parksituation an und auf BAB in Deutschland in den Nachtstunden, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach.

Bauer, F. et al. (2023), The market ramp-up of renewable hydrogen and its derivatives – the role of H2Global, FAU, eex, OTH und H2Global Policy Paper, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, European Energy Exchange AG, Ostbayerische Technische Hochschule und H2Global, Nürnberg, Leipzig, Regensburg und Hamburg.

BCG (2021), Klimapfade 2.0 – Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft, Gutachten für den Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI), Boston Consulting Group, Berlin.

Belitz, H., M. Clemens, S. Gebauer und C. Michelsen (2020), Öffentliche Investitionen als Triebkraft privatwirtschaftlicher Investitionstätigkeit, DIW Berlin: Politikberatung kompakt 158, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, Berlin.

Bergstrand, L. (2020), How can Internet of Things (IoT) enable more time-efficient documentation handling within intermodal freight transits? Examples from a Swedish road-rail intermodal terminal, Masterthesis, School of Business, Economics and Law at the University of Gothenburg, Göteborg.

Bernard, M.R., A. Tankou, H. Cui und P.-L. Ragon (2022), Charging solutions for battery electric trucks, ICCT White Paper, International Council on Clean Transportation, Washington, DC.

Berylls (2023), Battery Lifetime Value: How energy storage will determine the life cycle of electric trucks, <https://www.berylls.com/battery-lifetime-value-how-energy-storage-will-determine-the-life-cycle-of-electric-trucks/>, abgerufen am 26.3.2024.

BGL (2019), 35.000 bis 40.000 Lkw-Stellplätze fehlen an deutschen Autobahnen, Pressemitteilung, Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung, Frankfurt am Main, 17. Oktober.

Bhardwaj, S. und H. Mostofi (2022), Technical and business aspects of battery electric trucks – A systematic review, *Future Transportation* 2 (2), 382–401.

Bialek, S., Y. Dvorkin, J. Kim und B. Ünel (2023), Who knows what: Information barriers to efficient DER roll-out in the U.S., *Economics of Energy & Environmental Policy* 12 (1).

Biedenbach, F. und Y. Blume (2023), Size matters: Multi-use optimization of a depot for battery electric heavy-duty trucks, Konferenzpapier, 36th International Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS36), Sacramento, CA, 11. Juni.

Bieler, C. und D. Sutter (2019), Externe Kosten des Verkehrs in Deutschland: Straßen-, Schienen-, Luft- und Binnenschiffverkehr 2017, Schlussbericht im Auftrag von Allianz pro Schiene, INFRAS, Zürich.

van Binsbergen, A., R. Konings, L.A. Tavasszy und J.H.R. van Duin (2014), Innovations in intermodal freight transport: Lessons from Europe, Konferenzpapier, Papers of the 93th annual meeting of the Transportation Research Board (TRB), Washington, DC, 15. Januar.

Blechschmidt, J. et al. (2022), Handlungsoptionen für eine ökologische Gestaltung der Transportmittelwahl im Güterfernverkehr, Texte, Abschlussbericht 50/2022 (UBA FB00673), Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

Blume, Y., M. Hecker, M. Müller und A. Weiß (2023), Einfluss des Hochlaufs batterieelektrischer Nutzfahrzeuge auf die Verteilnetzplanung, FfE Discussion Paper 2023-01, Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München.

BMBF (2023), Welche Projekte für die internationale Wasserstoff-Kooperation fördert das BMBF?, <https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/kurzmeldungen/de/woher-soll-der-gruene-wasserstoff-kommen.html>, abgerufen am 26.4.2024.

BMDV (2023a), Verkehr in Zahlen 2023/2024, 52. Jahrgang, Bundesministerium für Digitales und Verkehr, Berlin.

BMDV (2023b), Verkehrsinvestitionsbericht 2021, Bundesministerium für Digitales und Verkehr, Berlin.

BMDV (2023c), Markthochlauf für Wasserstoff beschleunigen, <https://bmdv.bund.de/Shared-Docs/DE/Artikel/K/markthochlauf-wasserstoff-beschleunigen.html>, abgerufen am 10.4.2024.

BMDV (2023d), Entwurf eines Dritten Gesetzes zur Änderung mautrechtlicher Vorschriften, Referentenentwurf, Bundesministerium für Digitales und Verkehr, 25. April.

BMDV (2022), Brücken an Bundesfernstraßen – Bilanz und Ausblick, Bundesministerium für Digitales und Verkehr, Bonn.

BMDV (2021a), Schlüsseltechnologie für den Güterzug der Zukunft – Die Digitale Automatische Kupplung (DAK), <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/E/schiene-innovationen-forschung/schiennuetzerverkehr-digitale-automatische-kupplung-dak.html>, abgerufen am 28.2.2024.

BMDV (2021b), Europäische Eisenbahnpolitik, <https://bmdv.bund.de/DE/Themen/EU-Politik/EU-Verkehrspolitik/Europaeische-Schienenverkehrspolitik/europaeische-schienenverkehrspolitik.html>, abgerufen am 27.2.2024.

BMF (2024), BMF-Monatsbericht: Januar 2024, Bundesministerium der Finanzen, Berlin.

BMVI (2021), Richtlinie über die Förderung von leichten und schweren Nutzfahrzeugen mit alternativen, klimaschonenden Antrieben und dazugehöriger Tank- und Ladeinfrastruktur, Richtlinie KsNI, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Berlin, 2. August.

BMVI (2020), Investitionsrahmenplan 2019–2023 für die Verkehrsinfrastruktur des Bundes (IRP), Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Berlin.

BMVI (2016), Bundesverkehrswegeplan 2030, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Berlin.

BMVI (2015a), Verkehrsinfrastrukturbericht, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Berlin.

BMVI (2015b), Reformkommission Bau von Großprojekten, Endbericht, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Berlin.

BMWK (2023a), FAQ zum Wasserstoff-Kernnetz, <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/FAQ/Wasserstoff-Kernnetz/faq-wasserstoff-kernnetz.html>, abgerufen am 26.3.2024.

BMWK (2023b), Der Klima- und Transformationsfonds 2024: Entlastung schaffen, Zukunftsinvestitionen sichern, Transformation gestalten, Pressemitteilung, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, Berlin, 21. Dezember.

BMWK (2023c), Photovoltaik-Strategie: Handlungsfelder und Maßnahmen für einen beschleunigten Ausbau der Photovoltaik, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, Berlin.

BNNetzA (2024a), Marktuntersuchung Eisenbahnen 2023, Dezember 2023/Januar 2024, Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, Bonn.

BNetzA (2024b), Bundesnetzagentur veröffentlicht Daten zum Strommarkt 2023, Pressemitteilung, Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, Bonn, 3. Januar.

BNetzA (2024c), SMARD | Installierte Erzeugungsleistung, <https://www.smard.de/page/home/wiki-article/446/2362>, abgerufen am 28.2.2024.

BNetzA (2022a), Ergebnisse der Endkundenbefragung 2021 im Schienengüterverkehr, Endkundenkonsultation 2021, Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, Bonn.

BNetzA (2022b), Genehmigung des Szenariorahmens 2023–2037/2045, Bedarfsermittlung Stand Juli 2022, Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, Bonn.

BNetzA (2015), Positionspapier der Bundesnetzagentur: Dispositionsrichtlinien DB Netz AG, Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, Bonn.

Bom, P.R.D. und J.E. Lighthart (2014), What have we learned from three decades of research on the productivity of public capital?, *Journal of Economic Surveys* 28 (5), 889–916.

Böttger, C. (2023), Herausforderung Verkehrsinfrastruktur: heutiges System des Bundesverkehrswegebauplans, *Wirtschaftsdienst* 103 (6), 364–367.

Branchoux, C., L. Fang und Y. Tateno (2018), Estimating infrastructure financing needs in the Asia-Pacific least developed countries, landlocked developing countries, and small island developing states, *Economies* 6 (3), 43.

Branco, C., D.C. Dohse, J. Pereira Dos Santos und J. Tavares (2023), Nobody's gonna slow me down? The effects of a transportation cost shock on firm performance and behavior, *Journal of Urban Economics* 136, 103569.

Buchert, M. et al. (2023), Bedarf strategischer Rohstoffe für den Pkw- und Lkw-Sektor in Deutschland bis 2040, Bericht im Rahmen des Projekts „Analysen und Bewertungen der Klimaschutzwirkung von Instrumenten und Maßnahmen zur Treibhausgasminderung im Verkehr, Entwicklung von Gestaltungsoptionen“ ELM04010, im Auftrag des BMWK, Öko-Institut, Darmstadt.

Buchert, M. und J. Sutter (2020), Stand und Perspektiven des Recyclings von Lithium-Ionen-Batterien aus der Elektromobilität, Synthesepapier erstellt im Rahmen des vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit geförderten Verbundvorhabens MERCATOR „Material Effizientes Recycling für die Circular Economy von Automobilspeichern durch Technologie ohne Reststoffe“, Öko-Institut, Freiburg im Breisgau.

Bundeskartellamt (2021), Sektoruntersuchung zur Bereitstellung und Vermarktung öffentlich zugänglicher Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge, Sachstandsbericht Oktober 2021, Az. B8-28/20, Bonn.

Bundeskartellamt (2005), Beschluss vom 30.9.2005, B9-50/05 – Railion/RBH, Bonn, 30. September.

Bundesrechnungshof (2016), Bericht an den Haushaltsausschuss des Deutschen Bundestages nach §88 Abs. 2 BHO über die Plausibilisierung der Investitionskosten von Straßenbauprojekten zur Aufstellung des Bundesverkehrswegebauplans 2030, V3-2015-5056/III, Bonn.

Bundesregierung (2024), Ab Januar 2024 CO₂-Preis steigt auf 45 Euro pro Tonne, <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/co2-preis-kohle-abfallbrennstoffe-2061622>, abgerufen am 10.4.2024.

Bundesregierung (2023a), Gesetzentwurf der Bundesregierung Entwurf eines Dritten Gesetzes zur Änderung mautrechtlicher Vorschriften, Drucksache 270/23, Bundesrat, Berlin, 15. Juni.

Bundesregierung (2023b), Reform der Konzernstruktur der Deutsche Bahn Aktiengesellschaft, Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Wolfgang Wiehle, Dr. Dirk Spaniel, René Bochmann, weiterer Abgeordneter und der Fraktion der AfD, Drucksache 20/8945, Deutscher Bundestag, Berlin, 19. Oktober.

Bundesregierung (2023c), Finanzplan des Bundes 2023 bis 2027, Unterrichtung durch die Bundesregierung, Drucksache 321/23, Deutscher Bundestag, Berlin.

Bundesregierung (2023d), Der Klima- und Transformationsfonds 2024, Stand: 21. Dezember 2023, Berlin.

Bundesregierung (2023e), Aktueller Stand zur Umsetzung des Masterplans Schienenverkehr, Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Fraktion der CDU/CSU, Drucksache 20/6944, Deutscher Bundestag, Berlin, 24. Mai.

Bundesregierung (2022a), Aktuelle Probleme des Schienengüterverkehrs, Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Wolfgang Wiehle, Dr. Dirk Spaniel, René Bochmann, weiterer Abgeordneter und der Fraktion der AfD, Drucksache 20/603, Deutscher Bundestag, Berlin, 3. Februar.

- Bundesregierung** (2022b), Masterplan Ladeinfrastruktur II der Bundesregierung, Bundesministerium für Digitales und Verkehr, Berlin.
- Bundesregierung** (2019a), Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050, Stand: 9. Oktober 2019, Berlin.
- Bundesregierung** (2019b), Pünktlichkeit im Schienengüterverkehr, Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Dr. Christian Jung, Frank Sitta, Torsten Herbst, weiterer Abgeordneter und der Fraktion der FDP, Drucksache 19/9864, Deutscher Bundestag, Berlin, 6. Mai.
- Burges, K. und S. Kippelt** (2021), Grid-related challenges of high-power and megawatt charging stations for battery-electric long-haul trucks, Studie im Auftrag von Transport & Environment, Brüssel.
- Burke, A.F., J. Zhao, M.R. Miller, A. Sinha und L.M. Fulton** (2023), Projections of the costs of medium- and heavy-duty battery-electric and fuel cell vehicles (2020-2040) and related economic issues, *Energy for Sustainable Development* 77, 101343.
- Bushnell, J., E. Muehlegger und D. Rapson** (2021), Do electricity prices affect electric vehicle adoption?, ITS report UC-ITS-2020-12, UC Office of the President: University of California, Institute of Transportation Studies, Davis, CA.
- BVWP** (2018), Bundesverkehrswegeplan 2030 – Projekt 2-050-V01, https://www.bvwp-projekte.de/schiene_2018/2-050-V01/2-050-V01.html, abgerufen am 19.3.2024.
- Cantos, P., J.M. Pastor und L. Serrano** (2010), Vertical and horizontal separation in the European railway sector and its effects on productivity, *Journal of Transport Economics and Policy* 44 (2), 139–160.
- Carboni, M., A. Dall-Orsoletta, A. Hawkes und S. Giarola** (2024), The future of road freight transport and alternative technologies: A case study for Italy, *Energy Conversion and Management* 299, 117819.
- Castelvecchi, D.** (2022), The hydrogen revolution, *Nature* 611 (7936), 440–443.
- Cheng, X. und J. Lin** (2024), Is electric truck a viable alternative to diesel truck in long-haul operation?, *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 129, 104119.
- Christofzik, D.I., L.P. Feld und M. Yeter** (2019), Öffentliche Investitionen: Wie viel ist zu wenig?, *Schweizer Monat – Die Autorenzeitschrift für Politik, Wirtschaft und Kultur* 1064 (März), 60–63.
- Cordes, M.** (2023), Einzelwagenverkehr 2022 mit enormen Verlusten, *Deutsche Verkehrs-Zeitung*, 15. August.
- Costinot, A., J. Vogel und S. Wang** (2013), An elementary theory of global supply chains, *Review of Economic Studies* 80 (1), 109–144.
- Daimler Truck** (2024), Geschäftsbericht 2023, Daimler Truck Holding, Leinfelden-Echterdingen.
- Daimler Truck und TenneT TSO** (2022), Flexibility marketing options for charging processes of electric medium-duty and heavy-duty commercial vehicles, Feasibility study.
- DB** (2024a), Infrastrukturzustands- und -entwicklungsbericht 2023, Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung, Deutsche Bahn, Berlin.
- DB** (2024b), Investitionen und öffentliche Zuwendungen, <https://ir.deutschebahn.com/de/db-konzern/investitionen/>, abgerufen am 27.2.2024.
- DB** (2024c), Pilotprojekt zur Demonstration, Erprobung und Zulassung der Digitalen Automatischen Kupplung (DAK) für den Schienengüterverkehr, <https://www.dac4.eu/>, abgerufen am 28.2.2024.
- DB** (2024d), DB Cargo: Digitaler Güterzug geht in Kundeneinsatz, Presseinformation, Berlin, 2. April.
- DB** (2024e), BauInfoPortal Karlsruhe – Basel, BauInfoPortal, Projektbeschreibung, Deutsche Bahn, Berlin.
- DB** (2024f), Künstliche Intelligenz bei der DB, <https://www.deutschebahn.com/de/kuenstlicheintelligenz-6898594>, abgerufen am 28.2.2024.
- DB** (2024g), AI Prototyping – KI-basiertes Kapazitäts- und Verkehrsmanagement: Entwicklung von Software-Prototypen für die Planung und Disposition von Zugfahrten auf Basis künstlicher Intelligenz, <https://digitale-schiene-deutschland.de/AI-Prototyping>, abgerufen am 9.4.2024.
- DB** (2023a), Infrastrukturzustands- und -entwicklungsbericht 2022, Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung, Deutsche Bahn, Berlin.
- DB** (2023b), Daten & Fakten 2022, Deutsche Bahn, Berlin.

- DB (2023c), Integrierter Bericht 2022: Entwicklung der Infrastruktur Deutsche Bahn, <https://ibir.deutschebahn.com/2022/de/konzernlagebericht/entwicklung-der-geschaeftsfelder/geschaeftsfelder-im-systemverbund-bahn/infrastruktur/entwicklung-der-infrastruktur/>, abgerufen am 19.3.2024.
- DB (2022), Daten & Fakten 2021, Deutsche Bahn, Berlin.
- DB (2021), Erprobung automatisierter Güterzüge nimmt Fahrt auf, Presseinformation, Deutsche Bahn, Berlin, Mainz, 5. Oktober.
- DB Cargo (2024a), Einzelwagenverkehr: Flexibel und flächendeckend, <https://www.dbcargo.com/rail-de-de/leistungen/schienentransporte/einzelwagen>, abgerufen am 27.2.2024.
- DB Cargo (2024b), Geschäftsbericht 2023, Geschäftsbericht, Mainz.
- DB Cargo (2024c), Die Digitale Automatische Kupplung DAK, <https://www.dbcargo.com/rail-de-de/gruen-und-innovativ/dbcargo-lab/digitale-automatische-kupplung>, abgerufen am 28.2.2024.
- DB InfraGO (2024a), Netzzustandsbericht Fahrweg 2022, Geschäftsbereich Fahrweg, Frankfurt am Main.
- DB InfraGO (2024b), SGV: Anpassung Fördersatz Trassenpreisförderung ab 01.03.2024 auf 31,5 % beschlossen., <https://www.dbinfrago.com/web/aktuelles/kund-inneninformationen/kund-inneninformationen/2024-KW09-Anpassung-Foerdersatz-Trassenpreisfoerderung-12701528>, abgerufen am 26.3.2024.
- DB InfraGO (2024c), Projektbeschreibung: Ausbau- und Neubaustrecke Karlsruhe–Basel, <https://www.karlsruhe-basel.de/projektbeschreibung.html>, abgerufen am 27.2.2024.
- DB InfraGO und ÖBB Infra (2024), Projektüberblick: Bahnprojekt Brenner-Nordzulauf, <https://www.brennernordzulauf.eu/projektueberblick.html>, abgerufen am 27.2.2024.
- DB Netz (2024), Nutzungsbedingungen Netz der DB Netz AG (NBN 2024), Gültig ab 10.12.2023, Frankfurt am Main.
- De Vita, A. et al. (2021), EU reference scenario 2020 – Energy, transport and GHG emissions: Trends to 2050, Europäische Kommission, Generaldirektionen Energie, Klimapolitik sowie Mobilität und Verkehr, Brüssel.
- Demir, B., A.C. Fieler, D.Y. Xu und K.K. Yang (2024), O-ring production networks, *Journal of Political Economy* 132 (1), 200–247.
- dena (2021), dena-Leitstudie: Aufbruch Klimaneutralität – Eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe, Abschlussbericht, Deutsche Energie-Agentur, Berlin.
- Deutscher Bundestag (2023a), Bundesverkehrswegeplan und Ausbaugesetze – Aufnahme von Projekten, Ausarbeitung WD 5-3000-012/23, Deutscher Bundestag – Wissenschaftliche Dienste, Berlin.
- Deutscher Bundestag (2023b), Neuer EU-Emissionshandel für Gebäude und Straßenverkehr, Dokumentation WD 8-3000-001/23, Deutscher Bundestag – Wissenschaftliche Dienste, Berlin.
- Deutscher Bundestag (2023c), Fördermaßnahmen im Bereich Elektromobilität und Ladeinfrastruktur, Sachstand WD 5-3000-098/23, Deutscher Bundestag – Wissenschaftliche Dienste, Berlin.
- Deutscher Bundestag (2019), Expertenkritik an LuFV III, Verkehr und digitale Infrastruktur – Anhörung – hib 1132/2019, https://www.bundestag.de/webarchiv/presse/hib/2019_10/662764-662764, abgerufen am 10.4.2024.
- Die Güterbahnen (2023), Einzelwagenverkehrsförderung: Ja, aber richtig!, Presseinformation, Netzwerk Europäischer Eisenbahnen, Berlin, 27. September.
- Dittrich, M. et al. (2020), Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland – GreenLate, *Climate Change* 02/2020, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- DLR (2022), Güterverkehr in Deutschland – Verkehrsmittel im Vergleich, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, <https://www.dlr.de/de/aktuelles/nachrichten/daten-und-fakten/gueterverkehr-in-deutschland-verkehrsmittel-im-vergleich>, abgerufen am 26.2.2024.
- Dongfeng Motor (2024), Report on production and sales volume of Dongfeng Motor Group for 2023, Dongfeng Motor Group Company, Hong Kong.
- DSGV (2023), Branchenreport Logistik 2022, Deutscher Sparkassen- und Giroverband, Berlin.
- Dühnen, S., J. Betz, M. Kolek, R. Schmuch, M. Winter und T. Placke (2020), Toward green battery cells: Perspective on materials and technologies, *Small Methods* 4 (7), 2000039.

DWSV (2023), 3. Bayerischer Wasserstraßen- und Schifffahrtstag am 25.09.2023 in Nürnberg, <https://www.schifffahrtsverein.de/2023/07/25/3-bayerischer-wasserstrassen-und-schifffahrtstag-am-25-09-2023-in-nuernberg/>, abgerufen am 29.2.2024.

EBA (2021), Laufende Projekte: ATO, Eisenbahn-Bundesamt, https://www.eba.bund.de/Z-SGV/Projekte/laufende_Projekte/ATO/ato_node.html, abgerufen am 19.3.2024.

ECA (2023), Intermodal freight transport: EU still far from getting freight off the road, Special Report 08/2023, European Court of Auditors, Luxemburg.

EDA (2020), Das Schweizer Jahrhundertbauwerk, das Norden und Süden Europas näher zusammenrückt, Eidgenössisches Departement für auswärtige Angelegenheiten, <http://houseofswitzerland.org/de/swisstories/wirtschaft/das-schweizer-jahrhundertbauwerk-das-norden-und-sueden-europas-naeher>, abgerufen am 27.2.2024.

Edenhofer, O., C. Flachsland, M. Kalkuhl, B. Knopf und M. Pahle (2019), Optionen für eine CO₂-Preisreform, Expertise für den Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung, Arbeitspapier 04/2019, Wiesbaden.

Egerer, J., V. Grimm, L.M. Lang, U. Pfefferer und C. Sölch (2022), Mobilisierung von Erzeugungskapazitäten auf dem deutschen Strommarkt, Wirtschaftsdienst 102 (11), 846–854.

Eisenkopf, A., G. Jarzembowski, C. Kirchner, J. Ludewig, G. McCullough und W. Rothengatter (2006), The liberalisation of rail transport in the EU, *Intereconomics* 41 (6), 292–313.

Ekberg, K., L. Eriksson und C. Sundström (2021), Electrification of a heavy-duty CI truck—Comparison of electric turbocharger and crank shaft motor, *Energies* 14 (5), 1402.

e-mobil BW (2023), Europaweite Infrastruktur für alternative Kraftstoffe, <https://www.e-mobilbw.de/service/meldungen-detail/europaweite-infrastruktur-fuer-alternative-kraftstoffe>, abgerufen am 29.4.2024.

Eurailpress (2023), Multi-Agenten-KI hilft DB bei Zugdisposition, <https://www.eurailpress.de/railim-pacts/technologie/detail/news/multi-agenten-ki-hilft-db-bei-zugdisposition.html>, abgerufen am 23.4.2024.

Europäische Kommission (2023a), Vorschlag für eine VERORDNUNG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/1242 im Hinblick auf die Verschärfung der CO₂-Emissionsnormen für neue schwere Nutzfahrzeuge und die Einbeziehung von Meldepflichten sowie zur Aufhebung der Verordnung (EU) 2018/956, 6539/23, COM(2023) 88 final, Brüssel, 17. Februar.

Europäische Kommission (2023b), METIS 3, study S5: The impact of industry transition on a CO₂-neutral European energy system, erstellt vom Fraunhofer ISI, Generaldirektion Energie, Brüssel.

Europäische Kommission (2022a), Comparative evaluation of transshipment technologies for intermodal transport and their cost, Final Report; verfasst durch PricewaterhouseCoopers und KombiConsult, Generaldirektion Mobilität und Verkehr, Brüssel.

Europäische Kommission (2022b), Kommission leitet eingehende Prüfung der deutschen Unterstützungsmaßnahmen für DB Cargo ein, Pressemitteilung, Vertretung der Europäischen Kommission in Deutschland, Berlin, 31. Januar.

Europäische Kommission (2020), Handbook on the external costs of transport, Version 2019 – 1.1, 18.4K83.131, Generaldirektion Mobilität und Verkehr, Brüssel.

Europäische Kommission (2019a), State of play of internalisation in the European transport sector, 19.4K83.071a, Generaldirektion Mobilität und Verkehr, Brüssel.

Europäische Kommission (2019b), Transport taxes and charges in Europe: An overview study of economic internalisation measures applied in Europe, 18.4K83.138, Generaldirektion Mobilität und Verkehr, Brüssel.

Europäischer Rechnungshof (2016), Der Schienengüterverkehr in der EU: noch nicht auf dem richtigen Kurs, Sonderbericht 08, Luxemburg.

Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union (2023), Verordnung (EU) 2023/1804 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. September 2023 über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe und zur Aufhebung der Richtlinie 2014/94/EU, PE/25/2023/INIT, Straßburg, 13. September.

Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union (2019), Verordnung (EU) 2019/1242 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Juni 2019 zur Festlegung von CO₂-Emissionsnormen für neue schwere Nutzfahrzeuge und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 595/2009 und (EU)

2018/956 des Europäischen Parlaments und des Rates sowie der Richtlinie 96/53/EG des Rates, PE/60/2019/REV/1, Brüssel, 20. Juni.

[Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union](#) (2013), Verordnung (EU) Nr. 1315/2013 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2013 über Leitlinien der Union für den Aufbau eines transeuropäischen Verkehrsnetzes und zur Aufhebung des Beschlusses Nr. 661/2010/EU, OJ L 348, Straßburg, 11. Dezember.

[Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union](#) (2006), Verordnung (EG) Nr. 561/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 15. März 2006 zur Harmonisierung bestimmter Sozialvorschriften im Straßenverkehr und zur Änderung der Verordnungen (EWG) Nr. 3821/85 und (EG) Nr. 2135/98 des Rates sowie zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 3820/85 des Rates – Erklärung, OJ L 102, Straßburg, 15. März.

[Everfuel](#) (2023), Everfuel Interim Report Q2 2023, Interim Report, Herning, DK.

[EWI](#) (2022), Szenarien für die Preisentwicklung von Energieträgern, Studie Im Auftrag des Akademienprojekts „Energiesysteme der Zukunft“ (ESYS), Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln.

[EWI](#) (2021), dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität: Klimaneutralität 2045 – Transformation der Verbrauchssektoren und des Energiesystems, Gutachterbericht im Auftrag der Deutschen Energie-Agentur (dena), Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln.

[EWK](#) (2024), Stellungnahme zum Monitoring-Prozess „Energie der Zukunft“ Monitoringbericht, Stellungnahme Mai 2024, A. Löschel, V. Grimm, F.C. Matthes und A. Weidlich, Expertenkommission zum Monitoring-Prozess „Energie der Zukunft“, Berlin, Bochum, Freiburg, Nürnberg.

[Expertenrat für Klimafragen](#) (2024), Prüfbericht zur Berechnung der deutschen Treibhausgasemissionen für das Jahr 2023, Prüfung und Bewertung der Emissionsdaten gemäß § 12 Abs. 1 Bundes-Klimaschutzgesetz, Berlin.

[Fay, M.](#) (2001), Financing the future: Infrastructure needs in Latin America, 2000-05, Policy Research Working Paper WPS2545, Weltbank, Washington, DC.

[Fay, M. und T. Yepes](#) (2003), Investing in infrastructure: What is needed from 2000 to 2010?, Policy Research Working Paper WPS3102, Weltbank, Washington, DC.

[FAZ](#) (2022), Niedrigwasser bremst die Binnenschifffahrt aus, <https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/schneller-schlau/niedrigwasser-bremst-die-binnenschifffahrt-aus-18338070.html>, abgerufen am 26.3.2024.

[FR](#) (2024), Shell schließt alle Wasserstofftankstellen in den USA – zu wenig Nachfrage, Frankfurter Rundschau, Sacramento, CA, 12. Februar.

[Fraunhofer IKTS](#) (2023), Wann kommt der Natrium-Akku in Deutschland?, Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS, <https://www.ikts.fraunhofer.de/de/blog/wann-kommt-der-natrium-akku-in-deutschland.html>, abgerufen am 5.5.2024.

[Fraunhofer ISI](#) (2024), H2GO – Nationaler Aktionsplan Brennstoffzellen-Produktion, <https://www.isi.fraunhofer.de/de/competence-center/neue-technologien/projekte/h2go.html>, abgerufen am 2.5.2024.

[Fraunhofer ISI, Consentec, ifeu, und TU Berlin](#) (2024), Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3 – T45-Szenarien – Modul Verkehr, Im Auftrag des BMWK, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Consentec, Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, Technische Universität Berlin, Karlsruhe.

[Fraunhofer ISI, Consentec, ifeu, und TU Berlin](#) (2021), Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3, Kurzbericht: 3 Hauptszenarien, im Auftrag des BMWi, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Consentec, Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, Technische Universität Berlin, Karlsruhe.

[Frieske, B., S. Hasselwander, Ö. Deniz, S. Stieler und S. Schumich](#) (2023), Strukturstudie BW 2023 – Transformation der Automobil- und Nutzfahrzeugindustrie in Baden-Württemberg durch Elektrifizierung, Digitalisierung und Automatisierung, Projektbericht herausgegeben von e-mobil BW, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt – Institut für Fahrzeugkonzepte, IMU Institut, Stuttgart.

[G+S Magazin](#) (2021), Mautkosten: Auswirkungen der Maut auf die Transportkosten und Frachtpreise, <https://www.gs-magazin.de/blog/mautkosten-berechnung-und-auswirkungen/>, abgerufen am 29.2.2024.

- Gaus, D. (2023), Market access, productivity, and failing infrastructure: Evidence from German firms, SSRN Scholarly Paper 4505493, Social Science Research Network, Rochester, NY.
- Gaus, D. und H. Link (2020), Economic effects of transportation infrastructure quantity and quality: A study of German counties, DIW Discussion Paper 1848, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, Berlin.
- Göckeler, K., I. Steinbach, W.K. Görz, F. Hacker, R. Blanck und M. Mottschall (2023), StratES – Szenarien für die Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs: Studie auf Basis von Markthochlaufmodellierungen, Dritter Teilbericht des Forschungs- und Dialogvorhabens StratES, Öko-Institut, Berlin.
- Gornig, M. (2019), Investitionslücke in Deutschland: Und es gibt sie doch! Vor allem Kommunen sind arm dran, DIW aktuell 19, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, Berlin.
- Grimm, V., L. Oechsle und G. Zöttl (2024), Stromgestehungskosten von Erneuerbaren sind kein guter Indikator für zukünftige Stromkosten, UTN-FAU Policy Brief, Technische Universität Nürnberg, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.
- Grimm, V. und C. von Rüden (2022a), Es ist Zeit, sich aus wirtschaftlichen Abhängigkeiten zu lösen, Perspektiven der Wirtschaftspolitik 23 (4), 244–248.
- Grimm, V. und C. von Rüden (2022b), Die Krise bekämpfen, das Wirtschaftsmodell neu justieren, Wirtschaftsdienst 102 (12), 922–928.
- Günther, C., M. Pahle, K. Govorukha, S. Osorio und T. Fotiou (2024), Carbon prices on the rise? Shedding light on the emerging EU ETS2, PIK Working Paper, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Potsdam.
- H2-Share (2024), Dongfeng: 500 H2 trucks, <https://fuelcelltrucks.eu/project/dongfeng/>, abgerufen am 26.4.2024.
- Handelsblatt (2024a), Infrastruktur: Autobahngesellschaft fehlt Geld für Bau von Fernstraßen, Handelsblatt, Berlin, 10. April.
- Handelsblatt (2024b), Flottengrenzwerte: EU verabschiedet neue Vorgaben für Lkw-Abgase, Handelsblatt, Algier, Brüssel, Berlin, 9. Februar.
- Hanken, M. (2024), Rolle der Kommunen beim Ladeinfrastruktur-Aufbau, Rechtssichere Vergabe bei öffentlicher Ladeinfrastruktur (für Kommunen), Präsentation bei Energieagentur Rheinland-Pfalz, Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur, 5. März.
- Harthan, R.O. et al. (2023), Projektionsbericht 2023 für Deutschland, Climate Change 39/2023, hrsg. vom Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- Hebling, C. et al. (2019), Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI und Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Karlsruhe und Freiburg.
- Hildermeier, J. und A. Jahn (2024), The power of moving loads: Cost analysis of megawatt charging in Europe, RAP Analysis, Regulatory Assistance Project, Brüssel.
- Hirth, L., F. Ueckerdt und O. Edenhofer (2015), Integration costs revisited – An economic framework for wind and solar variability, Renewable Energy 74, 925–939.
- Hoekstra, A. (2019), The underestimated potential of battery electric vehicles to reduce emissions, Joule 3 (6), 1412–1414.
- Hosseini, S.E. und B. Butler (2020), An overview of development and challenges in hydrogen powered vehicles, International Journal of Green Energy 17 (1), 13–37.
- Hummels, D. (2007), Transportation costs and international trade in the second era of globalization, Journal of Economic Perspectives 21 (3), 131–154.
- IEA (2024), Batteries and secure energy transitions – Analysis and key findings, World Energy Outlook Special Report, Internationale Energieagentur, Paris.
- IEA (2023a), Global EV Outlook 2023: Catching up with climate ambitions, Internationale Energieagentur, Paris.
- IEA (2023b), Global Hydrogen Review 2023, Internationale Energieagentur, Paris.
- IEA (2022), World Energy Outlook 2022: An updated roadmap to Net Zero Emissions by 2050, Internationale Energieagentur, Paris.

IHK Nord (2017), Norddeutsche Infrastrukturprojekte beschleunigen: Von Dänemark und den Niederlanden lernen?, Thesenpapier, Arbeitsgemeinschaft Norddeutscher Industrie- und Handelskammern, Hamburg.

Intraplan und Trimode (2023), Prognose 2022 – Gleitende Langfrist-Verkehrsprognose 2021-2022, im Auftrag des BMDV, VB970426, Stand vom 01.03.2023, Intraplan Consult, TTS Trimode Transport Solutions, Bonn.

IRENA (2022), Accelerating hydrogen deployment in the G7: Recommendations for the Hydrogen Action Pact, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

Isuzu (2023), Integrated report 2023: Moving the world – for you, Isuzu Motors Limited, Yokohama.

ITF (2023a), ITF Transport Outlook Database, https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=ITF_OUTLOOK_2023_DOM_FREIGHT, abgerufen am 1.2.2024.

ITF (2023b), How governments can bring low-emission trucks to our roads – and fast, International Transport Forum Policy Papers, International Transport Forum Policy Paper 127, International Transport Forum, OECD Publishing, Paris.

Jaffe, A.B., R.G. Newell und R.N. Stavins (2005), A tale of two market failures: Technology and environmental policy, *Ecological Economics* 54 (2–3), 164–174.

Jöhrens, J. et al. (2022), Vergleichende Analyse der Potentiale von Antriebstechnologien für Lkw im Zeithorizont 2030, Teilbericht im Rahmen des Vorhabens „Elektrifizierungspotenzial des Güter- und Busverkehrs – My eRoads“, ifeu Institut für Energie- und Umweltforschung, PTV Transport Consult, Heidelberg / Karlsruhe.

de Jong, G., A. Schroten, H. van Essen, M. Otten und P. Bucci (2010), The price sensitivity of road freight transport – a review of elasticities, Report, Significance & CE Delft, Den Haag / Delft.

Kalkuhl, M., M. Kellner, T. Bergmann und K. Rütten (2023), CO₂-Bepreisung zur Erreichung der Klimaneutralität im Verkehrs- und Gebäudesektor: Investitionsanreize und Verteilungswirkungen, MCC-Arbeitspapier, Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change, Berlin.

KBA (2024), Güterbeförderung Jahr 2022, Verkehr europäischer Lastkraftfahrzeuge (VE) VE 4, Kraftfahrt-Bundesamt, Flensburg.

Kemmerling, A. und A. Stephan (2002), The contribution of local public infrastructure to private productivity and its political economy: Evidence from a panel of large German cities, *Public Choice* 113 (3), 403–424.

Kiani Mavi, R., N. Kiani Mavi, D. Olaru, S. Biermann und S. Chi (2022), Innovations in freight transport: A systematic literature evaluation and COVID implications, *International Journal of Logistics Management* 33 (4), 1157–1195.

von Knobelsdorff, K.-C. (2024), Die Förderung des Ladesäulenausbaus ist unverzichtbar, *Tagesspiegel Background Verkehr & Smart Mobility*, Berlin, 23. Januar.

König, A., L. Nicoletti, D. Schröder, S. Wolff, A. Waclaw und M. Lienkamp (2021), An overview of parameter and cost for battery electric vehicles, *World Electric Vehicle Journal* 12 (1), 21.

Kopper, C., K.-H. Hartwig, W. Rothengatter, E. Gawel und A. Eisenkopf (2013), Die Verkehrsinfrastruktur in Deutschland: marode und unterfinanziert, *Wirtschaftsdienst* 93 (10), 659–677.

Kreutzberger, E. (2004), The shipper's perspective on distance and time and the operator (intermodal goods transport) response, *European Transport \ Trasporti Europei* (25–26), 99–113.

Krutilla, K. und R. Krause (2011), Transaction costs and environmental policy: An assessment framework and literature review, *International Review of Environmental and Resource Economics* 4 (3–4), 261–354.

Kunert, U. und H. Link (2013), Transport infrastructure: Higher investments needed to preserve assets, *DIW Economic Bulletin* 3 (10), 12–17.

Kurmayer, N.J. (2023), Costly gap: Germany to fall significantly short of EU climate targets, <https://www.euractiv.com/section/energy-environment/news/costly-gap-germany-to-fall-significantly-short-of-eu-climate-targets/>, abgerufen am 25.4.2024.

Land.NRW (2019), Rheinbrücke Neuenkamp: 75 rechtswidrig überladene Lkw täglich. Lkw-Waage ist zum Schutz der Brücke weiter notwendig, Pressemitteilung, Staatskanzlei des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf, 30. Juli.

- [Lebeau, P., C. Macharis und J. Van Mierlo \(2019\)](#), How to improve the total cost of ownership of electric vehicles: An analysis of the light commercial vehicle segment, *World Electric Vehicle Journal* 10 (4), 90.
- [Leisinger, C. und M. Runkel \(2023\)](#), Vergleich der Verkehrsträger: Subventionen und staatlich induzierte Preisbestandteile im Güterverkehr auf Schiene und Straße, FÖS-Studie Im Auftrag von Netzwerk Europäischer Eisenbahnen (NEE), Forum Ökologisch-Soziale Marktwirtschaft, Berlin.
- [Li, S., L. Tong, J. Xing und Y. Zhou \(2017\)](#), The market for electric vehicles: Indirect network effects and policy design, *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists* 4 (1), 89–133.
- [Liimatainen, H., O. van Vliet und D. Aplyn \(2019\)](#), The potential of electric trucks – An international commodity-level analysis, *Applied Energy* 236, 804–814.
- [Link, S. und P. Plötz \(2022\)](#), Technical feasibility of heavy-duty battery-electric trucks for urban and regional delivery in germany – A real-world case study, *World Electric Vehicle Journal* 13 (9), 161.
- [Lischke, A. \(2023\)](#), Stand und Perspektiven alternativer Antriebstechniken für schwere Nutzfahrzeuge, in: Wiemer, K., M. Kern und T. Raussen (Hrsg.), *Bioabfall- und stoffspezifische Verwertung V: Tagungsband 34*. Kasseler Abfall- und Ressourcenforum, Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie, Kassel, 368–378.
- [Löbberding, H. et al. \(2020\)](#), From cell to battery system in BEVs: Analysis of system packing efficiency and cell types, *World Electric Vehicle Journal* 11 (4), 77.
- [Loth, E., C. Qin, J.G. Simpson und K. Dykes \(2022\)](#), Why we must move beyond LCOE for renewable energy design, *Advances in Applied Energy* 8, 100112.
- [Luderer, G., C. Kost und D. Sörgel \(2021\)](#), Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 – Szenarien und Pfade im Modellvergleich, Ariadne Report, im Auftrag des BMBF, Kopernikus-Projekt Ariadne, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Potsdam.
- [Maerschalk, G., G. Krause und K. Hinsch \(2017\)](#), Erhaltungsbedarfsprognose (BVWP) 2016-2030 der Bundesfernstraßen, Schlussbericht im Auftrag des BMVI, FE-Projekt 21.0054/2012, SEP Maerschalk, München.
- [Mao, S., Y. Zhang, G. Bieker und F. Rodriguez \(2023\)](#), Zero-emission bus and truck market in China: A 2021 update, ICCT Working Paper 2023–04, International Council on Clean Transportation, Peking.
- [Mareev, I., J. Becker und D.U. Sauer \(2018\)](#), Battery dimensioning and life cycle costs analysis for a heavy-duty truck considering the requirements of long-haul transportation, *Energies* 11 (1), 55.
- [Marker, S. \(2024\)](#), Impuls: Batteriewechsel – Antriebe im Straßengüterverkehr, Präsentation, Technische Universität Berlin, 7. Februar.
- [McKinnon, A. \(2021\)](#), Towards a carbon-free logistics, in: Secchi, C. und A. Gili (Hrsg.), *The global quest for sustainability: The role of green infrastructure in a post-pandemic world*, 1. Auflage, ISPI : Ledizioni LediPublishing, Mailand, 125–143.
- [Meier, M. und E. Pinto \(2024\)](#), COVID-19 supply chain disruptions, *European Economic Review* 162, 104674.
- [Meirich, C. \(2017\)](#), Berechnung und Bewertung der Gesamtleistungsfähigkeit von Eisenbahnnetzen, RWTH-Dissertation RWTH-2017-06606, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, Aachen.
- [Mizutani, F., A. Smith, C. Nash und S. Uranishi \(2015\)](#), Comparing the costs of vertical separation, integration, and intermediate organisational structures in European and East Asian railways, *Journal of Transport Economics and Policy* 49 (3), 496–515.
- [mofair und Die Güterbahnen \(2023\)](#), 8. Wettbewerber-Report Eisenbahnen 2023/24, mofair, Netzwerk Europäischer Eisenbahnen / Die Güterbahnen, Berlin.
- [Monopolkommission \(2023a\)](#), Bahn 2023: Time to GO: Endlich qualitätswirksam in den Wettbewerb!, Gutachten der Monopolkommission gemäß § 78 ERegG, Sektorgutachten 9, Bonn.
- [Monopolkommission \(2023b\)](#), Energie 2023: Mit Wettbewerb aus der Energiekrise, Gutachten der Monopolkommission gemäß § 62 EnWG, Sektorgutachten 9, Bonn.
- [Monopolkommission \(2021\)](#), Energie 2021: Wettbewerbschancen bei Strombörsen, E-Ladesäulen und Wasserstoff nutzen, Sektorgutachten der Monopolkommission gemäß § 62 EnWG, Sektorgutachten 8, Bonn.
- [Monopolkommission \(2019\)](#), Bahn 2019: Mehr Qualität und Wettbewerb auf die Schiene, Gutachten der Monopolkommission gemäß § 78 ERegG, Sektorgutachten 7, Bonn.

[Monopolkommission](#) (2015a), Bahn 2015: Wettbewerbspolitik aus der Spur?, Sondergutachten der Monopolkommission gemäß § 36 AEG, Sondergutachten 69, Bonn.

[Monopolkommission](#) (2015b), Energie 2015: Ein wettbewerbliches Marktdesign für die Energiewende, Sondergutachten der Monopolkommission gemäß § 62 Abs. 1 EnWG, Sondergutachten 71, Bonn.

[Moosbrugger](#), R. (2008), Disposition und Störfallmanagement bei der DB Netz AG, Präsentation beim Eisenbahntechnologisches Kolloquium 2008 der TU Darmstadt, DB Netz.

[Mortsiefer](#), H. (2024), Krisengipfel im Kanzleramt bringt keine Lösung, Tagesspiegel Background Energie & Klima, Berlin, 9. Februar.

[Muehlegger](#), E. und D. Rapson (2019), Understanding the distributional impacts of vehicle policy: Who buys new and used electric vehicles?, Policy Brief, UC Davis: National Center for Sustainable Transportation, Davis, CA.

[Mukhopadhyay](#), T. (2019), Innovations in thermal management systems for EVs, PreScouter – Custom Intelligence from a Global Network of Experts, <https://www.prescouter.com/2019/10/innovations-in-thermal-management-systems-for-evs/>, abgerufen am 24.4.2024.

[Mulholland](#), E. und N. Egerstrom (2024), European heavy-duty vehicle market development quarterly (January – June 2023), ICCT Market Spotlight, International Council on Clean Transportation.

[Musso](#), A., C. Piccioni, M. Tozzi, G. Godard, A. Lapeyre und K. Papandreou (2013), Road transport elasticity: How fuel price changes can affect traffic demand on a toll motorway, *Procedia – Social and Behavioral Sciences* 87, 85–102.

[Muthmann](#), T. (2004), Rechnerische Bestimmung der optimalen Streckenauslastung mit Hilfe der Streckendurchsatzleistung, Dissertation, Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik der Technischen Universität Darmstadt.

[NCFRP](#) (2012), Preserving and protecting freight infrastructure and routes, NCFRP Report 16, National Cooperative Freight Research Program; Transportation Research Board; National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, Washington, DC.

[netztransparenz.de](#) (2023a), § 19 StromNEV-Umlage 2024, <https://www.netztransparenz.de/de-de/Erneuerbare-Energien-und-Umlagen/Sonstige-Umlagen/-19-StromNEV-Umlage/-19-StromNEV-Umlagen-%C3%9Cbersicht/-19-StromNEV-Umlage-2024>, abgerufen am 21.3.2024.

[netztransparenz.de](#) (2023b), Ermittlung der Offshore-Netzumlage 2024 – Prognosekonzept und Berechnung der Übertragungsnetzbetreiber, Präsentation Stand: 25.10.2023, 50Hertz; Amprion; TenneT TSO; Transnet BW.

[netztransparenz.de](#) (2023c), Ermittlung der KWKG-Umlage 2024 – Prognosekonzept und Berechnung der Übertragungsnetzbetreiber, Präsentation Stand: 25.10.2023, 50Hertz; Amprion; TenneT TSO; Transnet BW.

[Next](#) (2024), Direktvermarktung von Strom aus Erneuerbaren Energien, <https://www.next-kraftwerke.de/wissen/direktvermarktung>, abgerufen am 27.3.2024.

[Nicoley](#), P. (2024), Darum macht die einzige öffentliche Wasserstofftankstelle in RLP dicht, <https://www.swr.de/swraktuell/rheinland-pfalz/koblenz/koblenz-wasserstoff-tankstelle-einzige-oeffentliche-in-rlp-macht-dicht-100.html>, abgerufen am 26.3.2024.

[Niemeier](#), D., D. Haag, F. Schäfer und M. Hufen (2024), Navigating the hydrogen ecosystem: What is preventing progress and how to gain momentum?, Strategy& – Part of the PwC network, München, Stuttgart, Hamburg.

[NLL](#) (2022a), Einfach laden an Rastanlagen: Auslegung des Netzanschlusses für E-Lkw-Lade-Hubs, im Auftrag des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr, Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur, Berlin.

[NLL](#) (2022b), Öffentliche Ladeinfrastruktur: Report November 2022, Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur, Berlin.

[Nothegger](#) (2023), Warum es so schwierig ist, Gütertransporte von der Straße auf die Schiene zu verlagern, <https://blog.nothegger-transporte.at/intermodal/warum-es-so-schwierig-ist-guetertransporte-von-der-strasse-auf-die-schiene-zu-verlagern/>, abgerufen am 8.4.2024.

[NOW](#) (2023a), Marktentwicklung klimafreundlicher Technologien im schweren Straßengüterverkehr, Auswertung der Cleanroom-Gespräche 2022 mit Nutzfahrzeugherstellern, Nationale Organisation Wasserstoff und Brennstoffzellentechnologie, Berlin.

[NOW](#) (2023b), Elektromobilität und Rohstoffe – Bedarfe und Verfügbarkeiten, Factsheet Stand: März 2023, Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, Berlin.

- NOW** (2020), Elektromobilität und Rohstoffe – Bedarfe, Verfügbarkeiten, Umweltauswirkungen, Factsheet Stand: September 2020, Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, Berlin.
- NPM** (2021a), Ladeinfrastruktur für batterieelektrische LKW, Arbeitsgruppe 5 „Verknüpfung der Verkehrs- und Energienetze, Sektorkopplung“, Nationale Plattform Zukunft der Mobilität, Berlin.
- NPM** (2021b), Positionspapier „Brennstoffzelle“, Arbeitsgruppe 4 „Sicherung des Mobilitäts- und Produktionsstandortes, Batteriezellproduktion, Rohstoffe und Recycling, Bildung und Qualifizierung“, Zwischenbericht, Nationale Plattform Zukunft der Mobilität, Berlin.
- NPM** (2020), Werkstattbericht Antriebswechsel Nutzfahrzeuge: Wege zur Dekarbonisierung schwerer Lkw mit Fokus der Elektrifizierung, Arbeitsgruppe 1 „Klimaschutz im Verkehr“, Nationale Plattform Zukunft der Mobilität, Berlin.
- NWR** (2024), Update 2024: Treibhausgaseinsparungen und der damit verbundene Wasserstoffbedarf in Deutschland, Grundlagenpapier, Nationaler Wasserstoffrat, Berlin.
- NWR** (2023a), Forschungs- und Entwicklungsbedarfe: Speicherung, Transport und Betankung von Wasserstoff im Bereich Straßenfahrzeuge und Bahn, Informations- und Grundlagenpapier, Nationaler Wasserstoffrat, Berlin.
- NWR** (2023b), Versorgung des Verkehrssektors mit grünem Wasserstoff und seinen Derivaten, Stellungnahme, Nationaler Wasserstoffrat, Berlin.
- NWR** (2023c), Eckpunkte für die prozessuale Weiterentwicklung der Wasserstoffnetzplanung, Stellungnahme, Nationaler Wasserstoffrat, Berlin.
- NWR** (2023d), Treibhausgaseinsparungen und der damit verbundene Wasserstoffbedarf in Deutschland, Grundlagenpapier, Nationaler Wasserstoffrat, Berlin.
- Nykvist, B. und O. Olsson** (2021), The feasibility of heavy battery electric trucks, *Joule* 5 (4), 901–913.
- Odenweller, A., F. Ueckerdt, G.F. Nemet, M. Jensterle und G. Luderer** (2022), Probabilistic feasibility space of scaling up green hydrogen supply, *Nature Energy* 7 (9), 854–865.
- OECD** (2024), National income – Value added by activity – OECD Data, <http://data.oecd.org/natincome/value-added-by-activity.htm>, abgerufen am 11.2.2024.
- OpenStreetMap contributors** (2024), Geofabrik GmbH retrieved from <https://www.geofabrik.de>, <https://download.geofabrik.de/europe/germany.html>; <https://www.openstreetmap.org/copyright>, abgerufen am 9.4.2024.
- Orangi, S., N. Manjong, D.P. Clos, L. Usai, O.S. Burheim und A.H. Strømman** (2024), Historical and prospective lithium-ion battery cost trajectories from a bottom-up production modeling perspective, *Journal of Energy Storage* 76, 109800.
- Paccar** (2024a), 2023 Annual report, Bellevue, WA.
- Paccar** (2024b), Sustainability presentation, ESG Presentation, Bellevue, WA.
- Pahle, M.** (2024), Die CO₂-Bepreisung im Umbruch, FES Impuls, Friedrich-Ebert-Stiftung, Bonn.
- Pallasch, J.** (2024), Öffentliche Ladeinfrastruktur für Lkw, Podiumsdiskussion der Agora Verkehrswende, Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur NOW, 12. März.
- Pehnt, M. et al.** (2023), Heizen mit 65 % erneuerbaren Energien – Begleitende Analysen zur Ausgestaltung der Regelung aus dem Koalitionsvertrag 2021, Teilbericht im Rahmen des Projektes „Gebäudeenergiegesetz und EPBD“, ifeu Heidelberg, ITG Dresden, Öko-Institut, Stiftung Umweltenergierecht.
- Pinto, J.T. de M., O. Mistage, P. Bilotta und E. Helmers** (2018), Road-rail intermodal freight transport as a strategy for climate change mitigation, *Environmental Development* 25, 100–110.
- Plötz, P. et al.** (2018), Alternative Antriebe und Kraftstoffe im Straßengüterverkehr – Handlungsempfehlungen für Deutschland, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Öko-Institut, ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung, Karlsruhe, Berlin, Heidelberg.
- Plötz, P., D. Speth, L. Kappler, F. Klausmann und B. Satvat** (2024), Megawatt-Laden im Lkw-Fernverkehr: Erste Erkenntnisse zu Herausforderungen und Lösungsansätzen, Bericht aus dem Projekt HOLA (Hochleistungsladen LKW-Fernverkehr), Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe.
- Plötz, P., M. Wietschel, H. Döscher und A. Thielmann** (2022), Status Quo und Zukunft von Wasserstoff im Verkehrssektor, <https://www.isi.fraunhofer.de/de/blog/2022/status-quo-und-zukunft-h2-Verkehrssektor.html>, abgerufen am 24.4.2024.

- Prognos**, Öko-Institut, und Wuppertal-Institut (2021), Klimaneutrales Deutschland 2045: Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann, Bericht im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende 209/01-ES-2021/DE, Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende, Berlin und Wuppertal.
- Puls**, T. (2022), Faktencheck Güterverkehr in Deutschland: Von der fehlenden Infrastruktur zum Verlagerungspotenzial, IW-Gutachten im Auftrag durch Pro Mobilität, Institut der deutschen Wirtschaft, Köln.
- Puls**, T. und E. Schmitz (2022), Wie stark beeinträchtigen Infrastrukturprobleme die Unternehmen in Deutschland?, IW Trends 49 (4), 89–110.
- Qorbani**, D., H.P.L.M. Korzilius und S.-E. Fleten (2024), Ownership of battery electric vehicles is uneven in Norwegian households, Communications Earth & Environment 5 (1), 170.
- Raffer**, C. und H. Scheller (2023), KfW-Kommunalpanel 2023, KfW Research, Deutsches Institut für Urbanistik, Frankfurt am Main.
- Ragon**, P.-L., E. Mulholland, H. Basma und F. Rodríguez (2022), A review of the AFIR proposal: Public infrastructure needs to support the transition to a zero-emission truck fleet in the European Union, ICCT White Paper, International Council on Clean Transportation, Washington, DC.
- Ramey**, V.A. (2021), The macroeconomic consequences of infrastructure investment, in: Glaeser, E.L. und J.M. Poterba (Hrsg.), Economic Analysis and Infrastructure Investment, University of Chicago Press, 219–276.
- Rapson**, D.S. und E. Muehlegger (2023), The economics of electric vehicles, Review of Environmental Economics and Policy 17 (2), 274–294.
- Reichelstein**, S. und A. Sahoo (2015), Time of day pricing and the levelized cost of intermittent power generation, Energy Economics 48, 97–108.
- Reiner**, M. (2023), Transport von Wasserstoff als Chance für Binnenschifffahrt, <https://www.br.de/nachrichten/wirtschaft/transport-von-wasserstoff-als-chance-fuer-binnenschifffahrt,TqsU7sl>, abgerufen am 27.2.2024.
- Repenning**, J. et al. (2023), Klimaschutzinstrumente-Szenario 2030 (KIS-2030) zur Erreichung der Klimaschutzziele 2030, Climate Change 30/2023, Teilbericht im Rahmen des Projektes „THG-Projektionen: Politikszenerarien für den Klimaschutz X“, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- Rickels**, W., C. Rischer, F. Schenuit und S. Peterson (2023), Potential efficiency gains from the introduction of an emissions trading system for the buildings and road transport sectors in the European Union, Kiel Working Paper 2249, Kiel Institut für Weltwirtschaft, Kiel.
- Roland Berger** (2013), Best-Practices-Studie zur Verkehrsinfrastrukturplanung und -finanzierung in der EU, Endbericht, im Auftrag von BDI, Agv MoVe, BBS, HDB, Pro Mobilität, VDA und VDV, Roland Berger Strategy Consultants, Berlin.
- Ruiz-Nuñez**, F. und Z. Wei (2015), Infrastructure investment demands in emerging markets and developing economies, Policy Research Working Paper WPS7414, Weltbank, Washington, DC.
- Runge**, P., C. Sölch, J. Albert, P. Wasserscheid, G. Zöttl und V. Grimm (2023), Economic comparison of electric fuels for heavy duty mobility produced at excellent global sites – a 2035 scenario, Applied Energy 347, 121379.
- Santamaría**, M. (2022), Reshaping infrastructure: Evidence from the division of Germany, mimeo.
- Scheller**, F., S. Wald, H. Kondziella, P.A. Gunkel, T. Bruckner und D. Keles (2023), Future role and economic benefits of hydrogen and synthetic energy carriers in Germany: A review of long-term energy scenarios, Sustainable Energy Technologies and Assessments 56, 103037.
- Schreyer**, F. et al. (2024), Distinct roles of direct and indirect electrification in pathways to a renewables-dominated European energy system, One Earth 7 (2), 226–241.
- Shacman** (2024a), New energy, <https://www.shacman.com/technology/new-energy.htm>, abgerufen am 26.4.2024.
- Shacman** (2024b), Heavy truck exports, reaching new heights, <https://www.shacmaninternational.com/news/heavy-truck-exports-reaching-new-heights/>, abgerufen am 26.4.2024.
- Shen**, W. et al. (2020), A comprehensive review of variable renewable energy levelized cost of electricity, Renewable and Sustainable Energy Reviews 133, 110301.
- Shirizadeh**, B. et al. (2024), Climate neutrality in European heavy-duty road transport: How to decarbonise trucks and buses in less than 30 years?, Energy Conversion and Management 309, 118438.

- Simpson**, J., E. Loth und K. Dykes (2020), Cost of Valued Energy for design of renewable energy systems, *Renewable Energy* 153, 290–300.
- Sinotruck** (2024), New energy vehicles, <https://en.sinotruk.com/eportal/ui?pa-geld=a0ed72c78fb649d2979c084cf9917c4f>, abgerufen am 26.4.2024.
- Sinotruck** (2023), Annual report 2022, Hong Kong.
- sohu** (2024a), Der Jahresabsatz von FAW Jiefang im Jahr 2023 wird 240.000 Einheiten betragen, wobei die Verkäufe schwerer Lkw um 47 % und die Verkäufe in Übersee um mehr als 60 % zunehmen werden (Übersetzung), https://www.sohu.com/a/751106639_120774496, abgerufen am 26.4.2024.
- sohu** (2024b), Markt für schwere Lkw 2023: Dongfeng fiel aus den Top drei, Beiben sprang auf den neunten Platz, und die beiden schweren Lkw mit neuer Energie konkurrierten um die Vorherrschaft (Übersetzung), https://www.sohu.com/a/755510516_120774496, abgerufen am 26.4.2024.
- SPD**, Bündnis 90/Die Grünen und FDP (2021), Mehr Fortschritt wagen – Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit, Koalitionsvertrag 2021-2025 zwischen der Sozialdemokratischen Partei Deutschlands (SPD), Bündnis 90/Die Grünen und den Freien Demokraten (FDP), Bundesregierung, Berlin.
- Speth**, D. und P. Plötz (2024), Depot slow charging is sufficient for most electric trucks in Germany, *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 128, 104078.
- Speth**, D., V. Sauter und P. Plötz (2022), Where to charge electric trucks in Europe – Modelling a charging infrastructure network, *World Electric Vehicle Journal* 13 (9), 162.
- Springel**, K. (2021), Network externality and subsidy structure in two-sided markets: Evidence from electric vehicle incentives, *American Economic Journal: Economic Policy* 13 (4), 393–432.
- Stamer**, V. (2021), Maritimer Handel: Stau im Suezkanal verschärft Folgen der Corona-Krise, *Medieninformation*, Institut für Weltwirtschaft, Kiel, 29. März.
- Statistisches Bundesamt** (2022), Umweltökonomische Gesamtrechnungen, Verkehr und Umwelt, Berichtszeitraum 2005 – 2020, Wiesbaden.
- Stephan**, A. (2003), Assessing the contribution of public capital to private production: Evidence from the German manufacturing sector, *International Review of Applied Economics* 17 (4), 399–417.
- Stephan**, A. (2001), Regional infrastructure policy and its impact on productivity: A comparison of Germany and France, WZB Discussion Paper FS IV 01 – 02, Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung.
- Stiglitz**, J.E. (2019), Addressing climate change through price and non-price interventions, *European Economic Review* 119, 594–612.
- Stoll**, F., A. Schüttert und N. Nießen (2017), Interoperabler Schienenverkehr in Europa, *Internationales Verkehrswesen* 69 (3), 36–39.
- Stolten**, D. et al. (2022), Neue Ziele auf alten Wegen? Strategien für eine treibhausgasneutrale Energieversorgung bis zum Jahr 2045, *Energie & Umwelt* 577, Forschungszentrum Jülich, Institut für Energie- und Klimaforschung Techno-ökonomische Systemanalyse (IEK-3), Jülich.
- SVR Wirtschaft** (2024), Die Schuldenbremse nach dem BVerfG-Urteil: Flexibilität erhöhen – Stabilität wahren, Policy Brief 1/2024, Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung, Wiesbaden.
- SVR Wirtschaft** (2023), Stellungnahme des SVR Wirtschaft zum Entwurf des Klimaschutzprogramms 2023, Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung, Wiesbaden.
- Tartler**, J. (2023), „Super-GAU für das Klima“, *Tagesspiegel Background Verkehr & Smart Mobility*, Berlin, 4. Oktober.
- Tata Motors** (2023a), Tata Motors India investor day 2023, Investorenpräsentation, Mumbai, 7. Juni.
- Tata Motors** (2023b), 78th Integrated annual report 2022-23, Mumbai.
- Tavasszy**, L.A. und J. van Meijeren (2011), Modal shift target for freight transport above 300 km: An assessment, 17th ACEA SAG Meeting, Discussion Paper, Association des Constructeurs Européens d'Automobile, Brüssel.
- T&E** (2023), A European response to US IRA: How Europe can use its soft and financial powers to build a successful electric vehicle value chain, Report, *Transport & Environment – European Federation for Transport and Environment*, Brüssel.

- [Thielmann, A. et al. \(2020\)](#), Batterien für Elektroautos: Faktencheck und Handlungsbedarf, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe.
- [Timmerberg, S., C. Dieckmann, R. Mackenthun und M. Kaltschmitt \(2017\)](#), Biomethane in transportation sector, in: Meyers, R.A. (Hrsg.), Encyclopedia of Sustainability Science and Technology, Springer, New York, NY, 1–31.
- [Tol, D., T. Frateur, M. Verbeek, I. Riemersma und H. Mulder \(2022\)](#), Techno-economic uptake potential of zeroemission trucks in Europe, TNO Report 2022 R11862, Transport & Environment, Agora Verkehrswende, Den Haag.
- [Transporeon \(2023\)](#), Road market update: The real cost of Germany's toll increase, <https://www.transporeon.com/en/community/blog/the-real-cost-of-germanys-toll-increase>, abgerufen am 27.2.2024.
- [Traton \(2024\)](#), Transform: 2023 Annual report, <https://annualreport.traton.com/2023/en/index.html>, abgerufen am 26.4.2024.
- [Traton \(2023\)](#), Traton way forward, Präsentation April 2023, München.
- [Trimode \(2022\)](#), Der Anteil von Transportkosten am Produktwert transportierter Güter, Endbericht an das Bundesministerium für Digitales und Verkehr, Trimode Transport Solutions, Freiburg im Breisgau.
- [UBA \(2024a\)](#), Bausteine für einen klimagerechten Verkehr, Klimaschutzinstrumente im Verkehr, Kurzpapier, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- [UBA \(2024b\)](#), Treibhausgas-Emissionen in Deutschland, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland>, abgerufen am 26.2.2024.
- [UBA \(2023a\)](#), Emissionen des Verkehrs, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/emissionen-des-verkehrs>, abgerufen am 26.2.2024.
- [UBA \(2023b\)](#), Der Europäische Emissionshandel, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/der-europaeische-emissionshandel>, abgerufen am 26.2.2024.
- [UBA \(2022\)](#), Hebel zur Gestaltung eines treibhausgasneutralen und umweltschonenden Güterverkehrs, Klimaschutzinstrumente im Verkehr, Kurzpapier, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- [UBA \(2021\)](#), Fahrleistungsabhängige Pkw-Maut, Klimaschutzinstrumente im Verkehr, Kurzpapier, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- [UBA \(2020a\)](#), Methodenkonvention 3.1 zur Ermittlung von Umweltkosten: Kostensätze, Stand 12/2020, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- [UBA \(2020b\)](#), Binnenschiffe, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr/emissionsstandards/binnenschiffe>, abgerufen am 26.2.2024.
- [Ueckerdt, F., C. Bauer, A. Dirnacher, J. Everall, R. Sacchi und G. Luderer \(2021\)](#), Potential and risks of hydrogen-based e-fuels in climate change mitigation, Nature Climate Change 11 (5), 384–393.
- [Ueckerdt, F., L. Hirth, G. Luderer und O. Edenhofer \(2013\)](#), System LCOE: What are the costs of variable renewables?, Energy 63, 61–75.
- [Ueckerdt, F. und A. Odenweller \(2023\)](#), E-Fuels – Aktueller Stand und Projektionen, PIK Analyse-Papier, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Potsdam.
- [Vallera, A.M., P.M. Nunes und M.C. Brito \(2021\)](#), Why we need battery swapping technology, Energy Policy 157, 112481.
- [vbw \(2023\)](#), Strompreisprognose 2023, vbw Studie durch Prognos, Vereinigung der Bayerischen Wirtschaft, München.
- [VCD \(2022\)](#), Deutschland-Takt, Verkehrsclub Deutschland, <https://www.vcd.org/artikel/deutschland-takt/>, abgerufen am 19.3.2024.
- [VCI \(2024\)](#), Mit Gleisanschluss-Charta Schienenverkehr zukunftsfähig machen, Pressemitteilung, Verband der Chemischen Industrie, Frankfurt am Main, 30. Januar.
- [Verdoodt, B. \(2024\)](#), Fluvius publiceert elektrische capaciteitswijzer voor bedrijven, <https://pers.fluvius.be/fluvius-publiceert-elektrische-capaciteitswijzer-voor-bedrijven>, abgerufen am 28.2.2024.
- [VM BW \(2024\)](#), Bedarfs- und Standortanalyse zum flächendeckenden Laden von E-Lkw in Baden-Württemberg, Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg, Stuttgart.
- [Volvo \(2024\)](#), Volvo Group: Annual report 2023, Volvo Group, Göteborg.

- Wang, X. (Cara) und D. Zhang (2017), Truck freight demand elasticity with respect to tolls in New York State, *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 101, 51–60.
- Weiss, A. et al. (2024), Zukunftspfad Stromversorgung: Perspektiven zur Erhöhung der Versorgungssicherheit und Wirtschaftlichkeit der Energiewende in Deutschland bis 2035, McKinsey & Company, Düsseldorf.
- Wieland, B. (2010), Europäische Verkehrspolitik und der Wettbewerb im Eisenbahnwesen und im Straßengüterverkehr, *Wirtschaftsdienst* 90 (13), 43–50.
- Wieland, B. und J. Ragnitz (2015), Produktivitäts- und Wachstumswirkungen von Verkehrsinfrastrukturinvestitionen: Ein Überblick, *Zeitschrift für Verkehrswissenschaft* 1, 1–46.
- Wietschel, M. et al. (2019), Klimabilanz, Kosten und Potenziale verschiedener Kraftstoffarten und Antriebssysteme für Pkw und Lkw, Endbericht, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe.
- Wietschel, M., B. Weißenburger, M. Rehfeldt, B. Lux, L. Zheng und J. Meier (2023), Preiselastische Wasserstoffnachfrage in Deutschland – Methodik und Ergebnisse, HYPAT Working Paper 01/2023, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe.
- Winkler, J.K., A. Grahle, A.M. Syré, K. Martins-Turner und D. Göhlich (2022), Fuel cell drive for urban freight transport in comparison to diesel and battery electric drives: a case study of the food retailing industry in Berlin, *European Transport Research Review* 14 (1), 2.
- Wissenschaftlicher Beirat beim BMDV (2022), Kompensation zukünftiger Einnahmeausfälle des Staates aufgrund der Antriebswende im Straßenverkehr, Gutachten 01/2022, Wissenschaftlicher Beirat beim Bundesminister für Digitales und Verkehr, Berlin.
- Wissenschaftlicher Beirat beim BMVBS (2009), Internalisierung externer Kosten des Straßengüterverkehrs, Stellungnahme, Wissenschaftlicher Beirat für Verkehr beim Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn.
- Wissenschaftlicher Beirat beim BMWi (2020), Öffentliche Infrastruktur in Deutschland: Probleme und Reformbedarf, Gutachten, Wissenschaftlicher Beirat beim Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Berlin.
- Wissenschaftlicher Beirat beim BMWi (2019), Energiepreise und effiziente Klimapolitik, Gutachten, Wissenschaftlicher Beirat beim Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Berlin.
- Wolff, S. und G. Balke (2024), Unter Strom: Potentiale Batterieelektrischer Lkw, Präsentation Expertengespräch, TUM School of Engineering and Design, Garching.
- Wolff, S., M. Lienkamp und K.-V. Schaller (2021), Status Nutzfahrzeuge 2020: Alles auf eine Karte?, Technische Universität München – Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik.
- Wolff, S., M. Seidenfus, K. Gordon, S. Álvarez, S. Kalt und M. Lienkamp (2020), Scalable life-cycle inventory for heavy-duty vehicle production, *Sustainability* 12 (13), 5396.
- World Energy Council (2021), Hydrogen demand and cost dynamics, Working Paper in collaboration with EPRI and PwC, London.
- Xing, J., B. Leard und S. Li (2021), What does an electric vehicle replace?, *Journal of Environmental Economics and Management* 107, 102432.
- Yiyu, S. (2021), FAW Jiefang hat eine neue Energiestrategie veröffentlicht, die auf die weltweit führenden Schlüsseltechnologien verweist (Übersetzung), <https://www.chinanews.com/cj/2021/09-29/9576887.shtml>, abgerufen am 26.4.2024.
- Zähringer, M., S. Wolff, J. Schneider, G. Balke und M. Lienkamp (2022), Time vs. capacity – The potential of optimal charging stop strategies for battery electric trucks, *Energies* 15 (19), 7137.
- Zerhusen, J., H. Landinger, Y. Astono, M. Böhm, J. Pagenkopf und F. Heckert (2023), H₂-Infrastruktur für Nutzfahrzeuge im Fernverkehr: Aktueller Entwicklungsstand und Perspektiven, Herausgegeben von e-mobil BW, Ludwig-Bölkow-Systemtechnik, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt – Institut für Fahrzeugkonzepte, Stuttgart.
- Zeyen, M. (2024), Overview of DC charging standardization and MCS, Rede, European Symposium on Truck Megawatt Charging 2024, EURAF Campus Berlin, 7. März.
- Zhu, F. et al. (2023), Does the battery swapping energy supply mode have better economic potential for electric heavy-duty trucks?, *eTransportation* 15, 100215.

Zoll (2024), Steuerermäßigte Verwendung, https://www.zoll.de/DE/Unternehmen/Herstellung-Vertrieb-in-Deutschland/Steuern/Strom/Steuerverguenstigung/Steuerermaessigte-Verwendung/steuerermaessigte-verwendung_node.html, abgerufen am 13.3.2024.