



Minderungsstrategien im Personen- und Güterverkehr

Heike Flämig, Carsten Gertz und Thorsten Mühlhausen

Inhaltsverzeichnis

- 32.1 Entwicklung der CO₂e-Emissionen im Verkehrssektor – 416
- 32.2 Sektorziel Verkehr – 419
- 32.3 Gründe für die Diskrepanz zwischen Zielsetzung und tatsächlicher Entwicklung im Sektor Verkehr – 419
- 32.4 Grundlegende Handlungsstrategien zur CO₂e-Minderung im Verkehrsbereich – 421
- 32.5 Handlungsoptionen zur Reduzierung der Verkehrsleistung – 422
- 32.6 Verkehrsmittelseitige CO₂e-Minderung – 423
- 32.7 Anpassungsmaßnahmen an Folgen des Klimawandels im Verkehrsbereich – 424
- 32.8 Kurz gesagt – 425
- Literatur – 425

Im Jahr 2019 war in Deutschland der Verkehrssektor für rund 20 % der energiebedingten Treibhausgase (THG) in CO₂-Äquivalente (CO₂e) verantwortlich (UBA 2021). Davon entfallen um die 95 % der verkehrsbedingten THG-Emissionen auf den motorisierten Straßenverkehr (TREMOD 2019; eigene Auswertung). Zudem entstehen Emissionen auch beim Erstellen und beim Erhalten der Verkehrsinfrastrukturen (z. B. durch die Betonproduktion) sowie bei der Herstellung von Fahrzeugen (Öko-Institut 2013). Zwar verbesserte sich sowohl die Effizienz im Güter- als auch im Personenverkehr. Die überproportionale Steigerung der Transportnachfrage konnte aber nicht ausgeglichen werden (Statistisches Bundesamt 2018). Absolut betrachtet sind seit dem Jahr 1990 die energiebedingten CO₂e-Emissionen durch den Verkehr zunächst angestiegen und erreichten im Jahr 1999 den höchsten Wert (UBA 2021). Dabei unterscheiden sich die Entwicklungen im Personen- und Güterverkehr und bei den Verkehrsträgern, ohne jedoch dem formulierten Ziel, die verkehrsbedingten THG-Emissionen zu reduzieren, näher zu kommen.

Insgesamt zeigt sich, dass die bisherigen Minderungsmaßnahmen nicht ausreichen, um den notwendigen Beitrag des Verkehrs zu den Klimaschutzzielen zu leisten. Das Klima hat sich bereits soweit verändert, dass zur Sicherung der Funktionssicherheit der Verkehrssysteme auch Anpassungsmaßnahmen notwendig sind. Die Folgen des Klimawandels, wie Extremwetterereignisse, können einerseits Personen, Produktionssysteme und die öffentliche Ordnung direkt gefährden und andererseits operative Anpassungsmaßnahmen notwendig machen. Die verringerte Zuverlässigkeit der Verkehrssysteme oder eine Beschränkung der Erreichbarkeit führen während einer Krise zu ökonomischen Konsequenzen auf der Nutzerseite und erhöhen den Aufwand für alle gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Institutionen, wie z. B. für Feuerwehr, Krankenhäuser, Grundversorgung.

men notwendig sind. Die Folgen des Klimawandels, wie Extremwetterereignisse, können einerseits Personen, Produktionssysteme und die öffentliche Ordnung direkt gefährden und andererseits operative Anpassungsmaßnahmen notwendig machen. Die verringerte Zuverlässigkeit der Verkehrssysteme oder eine Beschränkung der Erreichbarkeit führen während einer Krise zu ökonomischen Konsequenzen auf der Nutzerseite und erhöhen den Aufwand für alle gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Institutionen, wie z. B. für Feuerwehr, Krankenhäuser, Grundversorgung.

32.1 Entwicklung der CO₂e-Emissionen im Verkehrssektor

Hinsichtlich der betriebsbedingten Treibhausgasausstöße sind die Entwicklungen der Verkehrsleistung in Tonnenkilometer (tkm) oder Personenkilometer (Pkm) bzw. der Fahrleistung in Fahrzeugkilometer (Fkm) sowie des Fahrzeugbestands (z. B. Größenklasse, Euro-norm) von großer Bedeutung. Dabei unterscheiden sich die Entwicklungen im Bereich des Personen- und Güterverkehrs und bei den Verkehrsträgern.

Abb. 32.1 zeigt neben der Entwicklung der absoluten CO₂e-Emissionen im Verkehr (weinrot) eine Unterteilung für die Verkehrsträger Eisenbahn (grün),

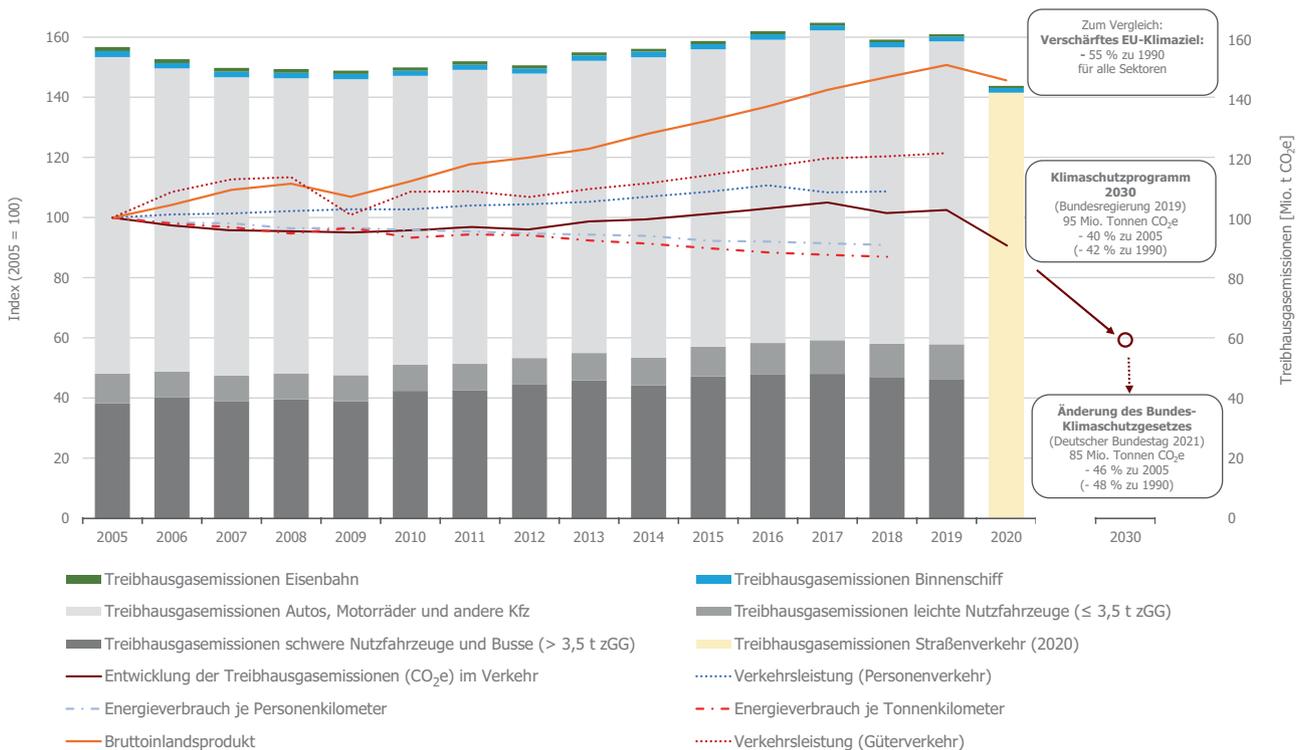
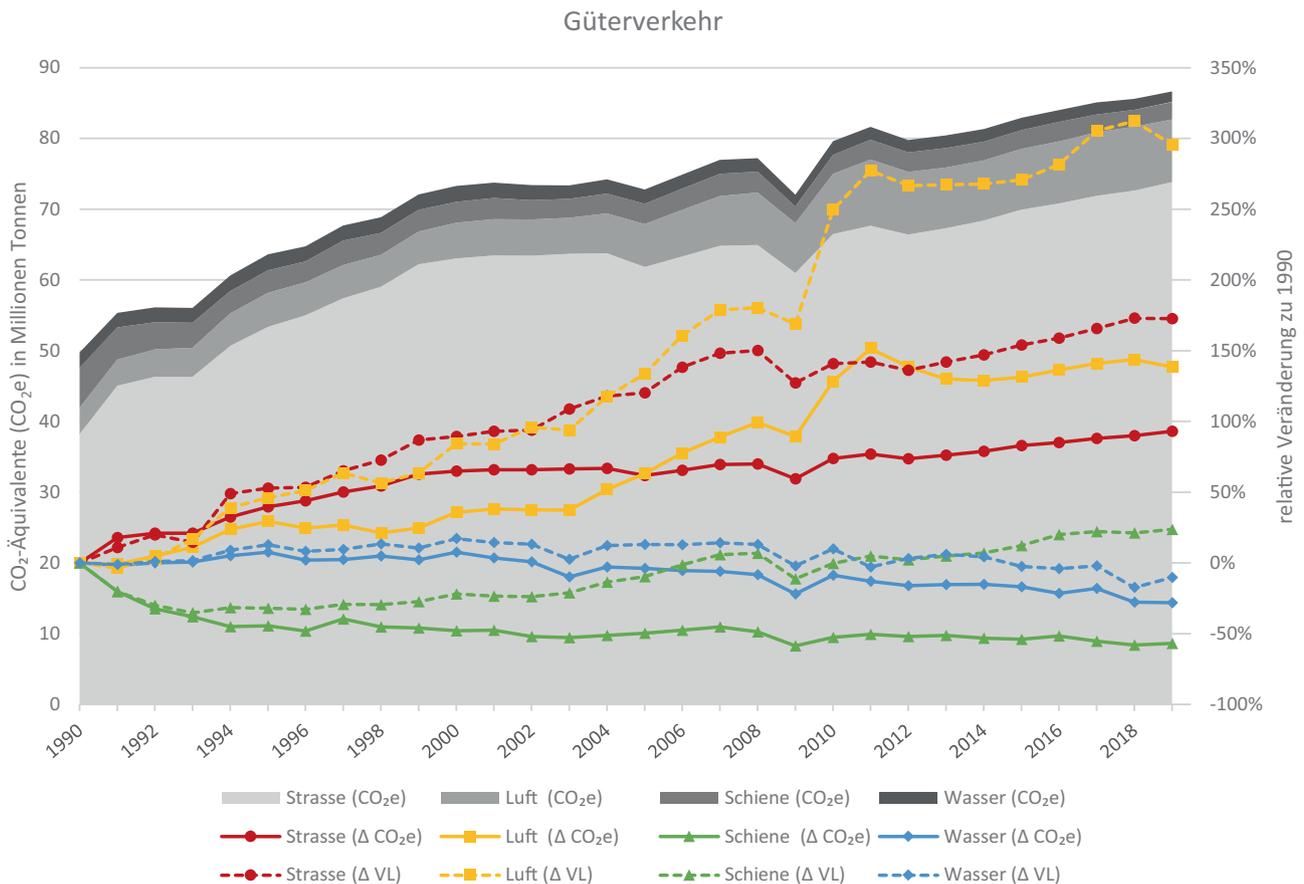


Abb. 32.1 Verkehrsleistung, Energieverbrauch und Bruttoinlandsprodukt – Entwicklung seit 2005 (= 100 %) – sowie absolute CO₂e-Emissionen je Verkehrsträger und unterschiedlicher Straßenfahrzeugklassen (2005–2019) in Bezug zu den politischen Reduktionszielen, zGG: zulässiges Gesamtgewicht. (Darstellung TUHH-VPL nach Statistisches Bundesamt 2021a; UBA 2021). (Flämig)



■ **Abb. 32.2** Entwicklung der CO₂e-Emissionen sowie der relativen Veränderungen (Δ) der CO₂e-Emissionen und der Verkehrsleistung (VL) im Personenverkehr in Deutschland 1990–2019. (Eigene Darstellung und Berechnungen auf Basis von TREMOD 6.16 – 05/2019)

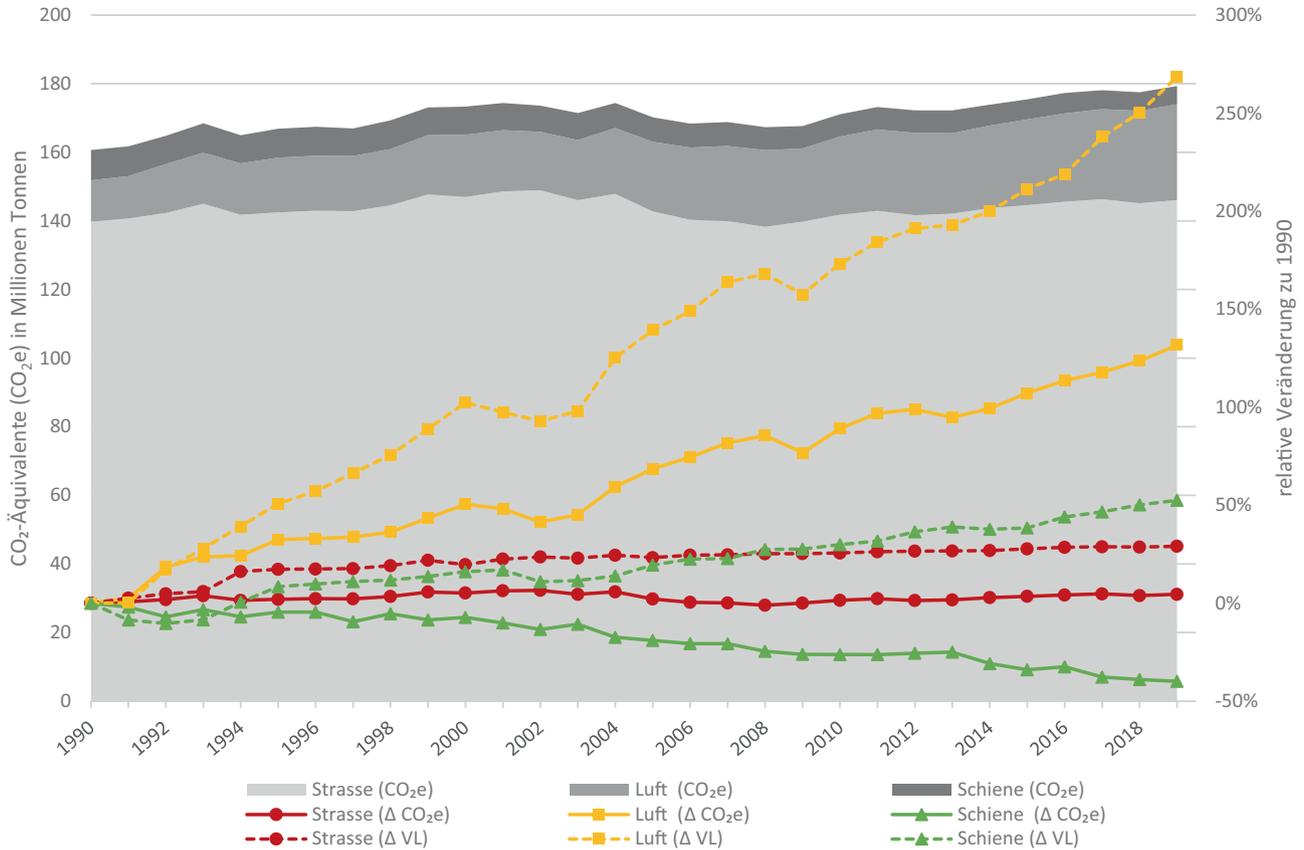
Binnenschiff (blau) und Straße, bei letzterem – bis auf das Jahr 2020, wo erst Schätzdaten für die Straße vorliegen (gelb) – in drei Straßenfahrzeugklassen (verschiedene Grautöne). Es wird deutlich, dass der wesentliche Anteil der absoluten transportbedingten CO₂e-Emissionen durch den Straßenverkehr (grau bzw. gelb) verursacht wird. Erzielte Effizienzgewinne, abgebildet als Energieverbrauch pro Tonnenkilometer bzw. Personenkilometer (Strich-Punkt-Linien), wurden jedoch durch die Steigerung der Transportnachfrage, abgebildet als relative Entwicklung der Personen- und Güterverkehrsleistung (Punktlinien), überkompensiert. Während trotz einer Zunahme der Personenverkehrsleistung deren absolute CO₂e-Emissionen nur moderat zunahm (blaue Punktlinie), stiegen bei stark zunehmender Güterverkehrsleistung die absoluten CO₂e-Emissionen durch den Güterverkehr (rote Punktlinie) deutlich. Insgesamt konnte kein Rückgang der Treibhausgasemissionen (durchgezogene Linie, weinrot) erreicht werden.

Im Jahr 2019 betrug die gesamte Fahrleistung von Personenkraftwagen (Pkw) 644,8 Mrd. Fahrzeugkilometer (BMVI 2021, S. 153). Die durchschnittliche jährliche Fahrleistung von Pkw lag im Jahr 2019

bei 13.600 km (BMVI 2021, S. 153). Auch der Pkw-Bestand nahm in den vergangenen Jahren zu und betrug am 01.01.2021 über 48,2 Mio. Fahrzeuge gegenüber knapp 30,7 Mio. Fahrzeuge im Jahr 1990 (KBA 2021a). Davon erfüllten über 38 % der Fahrzeuge mindestens die Abgasnorm Euro-6, deren Emissionsgrenzwerte seit dem 31. August 2018 für Neuzulassungen bindend waren. Der Anteil der PKW mit alternativen Antrieben wie Elektro-, Hybrid- oder Gasantrieb betrug am 01.01.2021 rund 3,6 % (KBA 2021b).

■ **Abb. 32.2** stellt die absolute Entwicklung der CO₂e-Emissionen inklusive der bei der Energiebereitstellung zu Verkehrszwecken entstandenen CO₂e-Emissionen (Vorketten) sowie die relative Veränderung der CO₂e-Emissionen und der Verkehrsleistung im Personenverkehr gegenüber dem Basisjahr 1990 auf deutschem Hoheitsgebiet dar. Für die internationalen Flüge sind die Verkehrsleistungen und deren CO₂e-Emissionen zwischen dem deutschen und dem nächsten bzw. letzten ausländischen Flughafen in die Werte eingeflossen. Die Grafik verdeutlicht, dass bezogen auf das Basisjahr 1990 trotz der Zunahme der Verkehrsleistung (VL) im Personenverkehr die absoluten energiebedingten CO₂e-Emissionen nach einer leicht-

Personenverkehr



■ **Abb. 32.3** Entwicklung der CO₂e-Emissionen sowie der relativen Veränderungen (Δ) der CO₂e-Emissionen und der Verkehrsleistung (VL) im Güterverkehr in Deutschland 1990–2019. (Eigene Darstellung und Berechnungen auf Basis von TREMOD 6.16 (05/2019)). (Flämig)

ten Abnahme bis zum Jahr 2005 inzwischen wieder moderat zunehmen. Eine ähnliche Entwicklung gilt auch für den motorisierten Straßenverkehr. Der deutliche Rückgang der energiebedingten CO₂e-Emissionen beim Schienenpersonenverkehr wird insbesondere durch den bis zum Jahr 2019 überdurchschnittlich ansteigenden Luftpersonenverkehr überlagert. Insgesamt kommt es im Luftverkehr trotz hoher Effizienzgewinne aufgrund der noch höheren Zuwächse der Verkehrsleistung zu einem deutlichen Anstieg der CO₂e-Emissionen.

Im Güterverkehr betrug im Jahr 2019 die gesamte Fahrleistung rund 67,1 Mrd. Fahrzeugkilometer nach einem Höchstwert von 71 Mrd. Fahrzeugkilometer im Jahr 2016 (BMVI 2021, S. 152 f.). Die durchschnittliche jährliche Fahrleistung der Lastkraftwagen (Lkw) beträgt rund 20.800 km und der Zugmaschinen rund 93.100 km (BMVI 2021, S. 153). Ebenso ist der Bestand an Nutzfahrzeugen angestiegen und betrug zum 1. Januar 2021 über 5 Mio. Fahrzeuge (KBA 2021a). Davon waren rund 3,5 Mio. LKW und Sattelzugmaschinen (KBA 2021a). Rund 33 % der LKW und 78 % der Sattelzugmaschinen hatten mindestens einen der Euro-6-Norm vergleichbaren Standard (KBA

2021b). Der Anteil an Lkw und Sattelzugmaschinen mit alternativen Elektro-, Hybrid-, Gas- oder Wasserstoffantrieb betrug rund 1,6 % (KBA 2021b).

Über 80 % der Gütertransporte in Deutschland – gemessen sowohl in den transportierten Mengen (Tonnage) als auch in der Transportleistung (in Tonnenkilometern) – werden mit steigender Tendenz vom Lkw übernommen (BMVI 2021, S. 241 ff.). Über 10 % davon von ausländischen Lkw. Auch die internationalen Verkehrsträger Seeschifffahrt und Luftverkehr haben erheblich an Bedeutung gewonnen. In der Folge nimmt der Gesamtenergieverbrauch im Bereich des Güterverkehrs weiter zu (Statistisches Bundesamt 2021a).

Wie ■ Abb. 32.3 zeigt, wird der Anstieg der energiebedingten CO₂e-Emissionen inklusive Vorketten durch den Güterverkehr vor allem durch die Zunahme der Verkehrsleistung im Luftverkehr und teilweise im Straßengüterverkehr bestimmt. In der Grafik sind nur Verkehrsleistungen auf deutschem Hoheitsgebiet erfasst, mit Ausnahme des internationalen Flugverkehrs, der analog zum Personenverkehr bis zum nächsten bzw. letzten ausländischen Flughafen berücksichtigt ist.

Auswirkungen der Covid-19-Pandemie auf die Verkehrsentwicklung und den Klimaschutz im Verkehr

Die Covid-19-Pandemie und die damit einhergehenden Einschränkungen in der Bewegungsfreiheit führten in den Jahren 2020/2021 zu einem deutlich reduzierten Gesamtverkehrsaufkommen durch Personenmobilität im Vergleich zu den Vorjahren. Vor allem führte die Covid-19-Pandemie zu einem Rückgang der Personenmobilität in den Agglomerationen und zu einem starken Fahrgastrückgang im öffentlichen Verkehr bei gleichzeitiger Bevorzugung des privaten PKW (Statistisches Bundesamt 2021b). Den stärksten Rückgang verzeichneten Flugreisen, sodass die Flugbewegungen im Jahr 2020 um 56 % in Deutschland zurückgingen (Eurocontrol 2021). Dies führte in Deutschland zu einem Rückgang der durch den Luftverkehr verursachten CO₂-Emissionen. Ein Wiederanstieg des Luftverkehrsaufkommens auf das Niveau des Jahres 2019 wird je

nach weiterem Verlauf der Covid-19-Pandemie zwischen den Jahren 2024 und 2029 erwartet. Dabei wird mit einer veränderten Nachfragestruktur gerechnet, insbesondere mit weniger Geschäftsreisen, aufgrund der in der Krise gesammelten positiven Erfahrungen mit Onlinebesprechungen (Hagen et al. 2020). Für den bodengebundenen Verkehr stellt sich insbesondere die Frage, wie sich Heimarbeit und Onlineshopping nach der Covid-19-Pandemie dauerhaft entwickeln und welche Auswirkungen sich dadurch auf die Raumstruktur (Wohnstandortwahl, Bedeutung der Innenstädte) ergeben. Im Güterverkehr war der Nachfragerückgang nicht ganz so stark und es kam vor allem zu Anteilsverschiebungen hin zum Straßengüterverkehr. Einen Bedeutungszuwachs in der Covid-19-Pandemie hatten Lieferdienste in die Wohngebiete.

32.2 Sektorziel Verkehr

Im Jahr 2020 waren bis zu 150 Mio. t CO₂-Äquivalente im Sektor Verkehr zulässig, wobei diese nur aufgrund des Verkehrsrückgangs während der Covid-19-Pandemie eingehalten werden konnten (UBA 2021). Die Klimaziele des *Green Deal* der EU sehen eine Klimaneutralität bis zum Jahr 2050 sowie für den Verkehrssektor zunächst ein Reduktionsziel der THG-Emissionen von 90 % gegenüber dem Jahr 1990 vor (Europäische Kommission 2020; Council of the European Union 2021). Mit dem Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) vom 12. Dezember 2019¹ wurde erstmals für den Sektor Verkehr (ziviler inländischer Luftverkehr, Straßenverkehr, Schienenverkehr, inländischer Schiffsverkehr) eine zulässige Jahresemissionsmenge festgelegt, die auf 85 Mio. t CO₂-Äquivalente im Jahr 2030 sinken sollen².

Insgesamt sind in den letzten Jahren die Ziele für den Verkehrsbereich ambitionierter geworden. Es existiert zwar eine Vielzahl von Szenarien zu Klimaschutz und Verkehr (z. B. Bergk et al. 2017; Friedrich 2020; Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut 2021). Die Gemeinsamkeit der Szenarien ist, dass eine Einhaltung von Klimaschutzzielen im Verkehr umfassende Maßnahmenpakete voraussetzt, wie beispielsweise im Klimaschutzprogramm 2030 (Bundesregierung 2019).

Bislang fehlen Beschlüsse zu Maßnahmen, die dem Erreichen dieser Ziele umfassend gerecht werden.

32.3 Gründe für die Diskrepanz zwischen Zielsetzung und tatsächlicher Entwicklung im Sektor Verkehr

In den letzten Jahren ist es im Sektor Verkehr nicht gelungen, den THG-Ausstoß deutlich zu reduzieren und die Reduktionsziele zu erreichen. Ursachen dafür sind weiter anhaltende Wachstumsprozesse im Verkehr sowie die fehlende politische Konsequenz in der umfassenden Umsetzung von gegensteuernden Maßnahmen. Die Gründe für das seit langem anhaltende Verkehrswachstum und die Anteilsverschiebungen zwischen den Verkehrsträgern sind vielfältig, häufig miteinander verknüpft und seit längerem diskutiert (z. B. Flämig 2011).

Der Ausbau der Verkehrswege, die Entwicklung der Verkehrstechnologien und die Liberalisierung des Transportmarktes haben zu einem erheblichen Wachstum insbesondere im Straßenverkehr beigetragen. Die rasante Entwicklung bei den Informations- und Kommunikationstechnologien führt zu globalen Produktions- und Handelsnetzwerken sowie zu logistischen Konzepten, mit dem Ziel, Warebestände abzubauen und gleichzeitig schnell und flexibel auf die Nachfrage reagieren zu können. Damit erhöht sich insbesondere die Nachfrage nach Transporten von kleinteiligen Sendungen auf der Straße und beim internationalen Transport zunehmend von Luftfracht. Aus der internationalen Perspektive führen zudem die Bevölkerungs- und Wirtschaftsentwicklung, insbesondere aufgrund des Wegfalls von Handelsbarrieren und der

¹ Bundesgesetzblatt Jahrgang 2019 Teil I Nr. 48; in Reaktion auf ein Urteil des Bundesverfassungsgerichtes geändert am 18. August 2021, Bundesgesetzblatt Jahrgang 2021 Teil I Nr. 59.

² Gem. § 4 Anlage 2 Erstes Gesetz zur Änderung des Bundes-Klimaschutzgesetzes vom 18. August 2021, Bundesgesetzblatt Jahrgang 2021 Teil I Nr. 59, ausgegeben zu Bonn am 30. August 2021.

immer effizienter werdenden Transportbedingungen (z. B. durch das Größenwachstum der Seeschiffe) mit den damit verbundenen geringeren Transportkosten, zu einer Ausweitung der räumlichen Arbeitsteilung und damit zu einem weiteren Wachstum der Verkehrsnachfrage.

Standortentscheidungen und Siedlungsentwicklung haben sowohl für den generierten Verkehr durch den Transport von Gütern als auch für die Mobilität von Personen eine große Bedeutung. So steigen die Fahrleistungen, wenn Gewerbestandorte aufgrund von Flächenengpässen oder immissionsrechtlichen Gründen aus den Städten verdrängt werden. Auch die Suburbanisierung von Wohnstandorten verlängert Wege, wenn der Arbeitsstandort bestehen bleibt. Die Wegelängen steigen auch durch die Ausdünnung bei Versorgungs- und sozialen Einrichtungen, die häufig zu größeren Einzugsbereichen führen. Der Verkehrsinfrastrukturausbau verringert die Raumwiderstände und ermöglicht somit die Erreichbarkeit weiter entfernt liegender Standorte in gleicher Zeit, wodurch der Transportaufwand weiter ansteigt. Das Verkehrswachstum in Deutschland ist daher vor allem ein Ergebnis des Wachstums der Entfernungen.

Im Güterverkehr bleibt das tonnagebezogene Transportaufkommen nahezu konstant. Auch im Personenverkehr ist die Anzahl der Wege pro Person und Tag im zeitlichen Verlauf ebenso wie das individuelle tägliche Reisezeitbudget im statistischen Durchschnitt relativ konstant geblieben (Nobis und Kuhnimhof 2018). Die durch den Infrastrukturausbau ermöglichten Zeitvorteile beeinflussen in der Konsequenz wieder Standortentscheidungen, da bei gleicher Reisezeit durch schnellere Straßen- oder Bahnverbindungen längere Wege zurückgelegt werden können. Diese Zusammenhänge zwischen räumlicher Entwicklung und Verkehrsinfrastruktur überlagern sich wiederum mit den Anforderungen anderer Lebensbereiche wie etwa des Arbeitsmarktes, sodass die Bereitschaft und die Notwendigkeit zu längeren Entfernungen gleichermaßen ansteigen. In der Konsequenz zeigen sich im Personenverkehr in der Verkehrsmittelnutzung und der Verkehrsleistung in Abhängigkeit vom Wohnstandort deutliche Unterschiede. Die in der Vergangenheit erzielten treibhausgasrelevanten Effizienzgewinne und Verlagerungen auf den Umweltverbund (Busse und Bahnen, Fahrrad, zu Fuß gehen) wurden nicht nur durch gestiegene Verkehrsaufwände im Personenverkehr, sondern auch durch die Zunahme der durchschnittlichen Motorleistung bei Pkw-Neuzulassungen kompensiert (Statistisches Bundesamt 2018; Schelewsky et al. 2020).

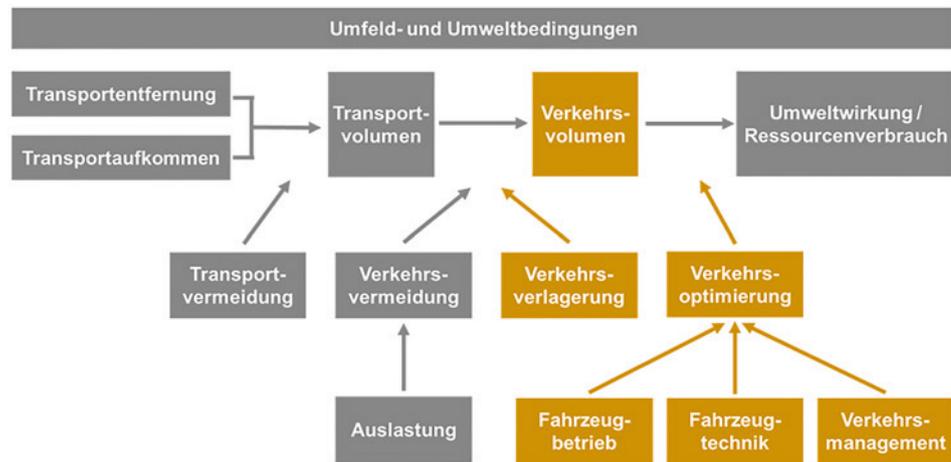
Die bisherige Entwicklung mit einem anhaltend hohen Treibhausgasausstoß im Verkehr ist zudem durch eine weitgehende Konstanz bei Verhaltensroutinen von privaten Haushalten geprägt (Sche-

lewsky et al. 2020; Holz-Rau und Schreiner 2020). Die Bevölkerung nimmt weiterhin keinen Handlungsdruck wahr, der über freiwillige Verhaltensänderungen die erforderliche Trendwende hervorruft. Darüber hinaus stößt ein ambitioniertes, individuelles klimaneutrales Verkehrsverhalten schnell an Grenzen, da wichtige Rahmenseetzungen, wie z. B. bezahlbare Fahrzeugtechnik oder ausreichend günstiger Wohnraum in Nutzungsgemischten Lagen, vielfach nicht gegeben sind und häufig mit finanziellen Nachteilen verbunden ist.

Die ausbleibende Verkehrswende liegt auch an der bislang verfehlten Politik zu umfassenden, direkt verhaltenswirksamen Maßnahmen. Ein Beispiel hierfür ist die bisherige Ausgestaltung der CO₂-Preise im Straßenverkehr. Während der Flugverkehr seit dem Jahr 2012 am Emissionshandel teilnimmt, ist der Straßenverkehr nicht Bestandteil des europäischen Emissionshandels. Allerdings wurde in Deutschland mit dem Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) für Kraftstoffe ein CO₂-Preis von 10 €/t CO₂ zum 1. Januar 2021 eingeführt, der bis zum Jahr 2025 auf 35 €/t CO₂ steigen soll. Für den Liter Benzin folgt aus dem CO₂-Preis von 35 €/t CO₂ ein nominaler Aufschlag von knapp 10 ct/l Benzin und rund 11 ct/l Diesel. Der CO₂-Preis ergänzt die Energiesteuer, die eine fixe Steuer (seit dem Jahr 2003: 65,45 ct/l Benzin) ohne Inflationsausgleich und Berücksichtigung der Einkommenssteigerung ist. Die beschlossenen CO₂-Preise setzen in der jetzigen Höhe allerdings bei gleichzeitig erhöhter Entfernungspauschale (befristet bis zum 31.12.2026 auf 5 ct/km ab dem 21. km, einfache Entfernung) und inflationsbedingt sinkender Energiesteuer keinen relevanten Anreiz zur Reduzierung der CO₂-Emissionen im Verkehr (Holz-Rau 2019). Ähnliches ist von der ab dem Jahr 2023 geltenden CO₂-gespreizten Lkw-Maut zu erwarten, da Doppelbesteuerungen auf jeden Fall vermieden werden sollen. Eine gesellschaftssensitive Transformation vom fossilen zum postfossilen Verkehr ist notwendig, wenn Energiepreissteigerungen und Versorgungsengpässe nicht zu sozialen und ökonomischen Konflikten führen sollen (vgl. Bauriedl et al. 2021).

Die Lösung der verkehrsbedingten Klimaprobleme wurde bisher vor allem im Verkehrssystem selbst gesucht. Technologische und organisatorische Maßnahmen beim Einsatz der Transport- und Verkehrsmittel stehen häufig einseitig im Vordergrund und reichen nicht aus. Die dargestellten komplexen Systemstrukturen, Bedingungen und Wechselwirkungen von einerseits Produktions-, Logistik- und Gütertransportsystemen sowie andererseits von Mobilität von Personen, räumliche Entwicklungen und gesellschaftliche Veränderungen erfordern Handlungsansätze, die diesen Zusammenhängen gerecht werden. Es muss integriert vorgegangen werden, um die THG-Emissionen

■ **Abb. 32.4** Ansatzpunkte zur Reduzierung der verkehrsbedingten Umweltwirkung. (Modifiziert nach Flämig 2014)



ebenso wie die anderen Verkehrsfolgen, z. B. Lärmemissionen, weitere Luftschadstoffe, Flächenversiegelung und Unfälle, zu reduzieren. Zudem kommt eine an Klimaschutzziele orientierte Planung und Politik nicht nur der Reduzierung der THG-Emissionen zugute, sondern erreicht darüber hinaus eine Verbesserung der Luftqualität und eine Erhöhung der Lebens- und Wohnqualität in urbanen Räumen (Holz-Rau und Schreiner 2020).

32.4 Grundlegende Handlungsstrategien zur CO₂e-Minderung im Verkehrsbereich

Die verkehrsbedingten Ressourcenverbräuche und Emissionen lassen sich grundsätzlich mit einer einfachen Formel ermitteln: Die bewegte Menge (Tonnen oder Personen) wird mit der Entfernung (Kilometer) und mit einem Faktor für den Ressourcenverzehr je Einheit (z. B. t je km) oder für die Emissionsmenge in Abhängigkeit vom Verkehrsmittel (Gramm an Emissionen je tkm bzw. Pkm) multipliziert. Wie in ■ Abb. 32.4 dargestellt, sind die wesentlichen Steuerungsgrößen die Anzahl an transportierten Einheiten bzw. die zurückgelegten Wege (Transportaufkommen) und die Transportentfernung. Durch eingesetzte Verkehrsmittel zur Realisierung der Transportnachfrage entsteht Verkehr. Die Art (z. B. Zug, Lkw) und technische Konfiguration (z. B. Lang-Lkw, Volumentrailer) des eingesetzten Verkehrsmittels und dessen Auslastung sowie die Fahrzeugtechnik und deren Betrieb beeinflussen ebenso die verkehrsbedingte Umweltwirkung (Flämig 2012).

Daraus lassen sich sieben grundsätzliche Mechanismen für die CO₂e-Minderung im Verkehrsbereich ableiten:

- Transportvermeidung reduziert die Notwendigkeit der Ortsveränderung von Personen und Gütern.
- Verkehrsvermeidung verringert die Fahrleistung durch die Verkürzung von Entfernungen sowie die Optimierung von Touren.
- Verkehrsverlagerung zielt auf eine veränderte Verkehrsmittelwahl hin zu Verkehrsmitteln mit geringeren spezifischen CO₂e-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus (g/Pkm bzw. g/tkm), also unter heutigen *product-carbon-footprints* von Pkw und Lkw sowie Luftverkehr hin zu Bahn und Schiff sowie auf ÖPNV, Fahrrad und Fußverkehr.
- Auslastungserhöhung steigert den Besetzungsgrad von Fahrzeugen im Personenverkehr und die Beladung von Fahrzeugen bzw. Ladeeinheiten (z. B. Container) im Güterverkehr.
- Verkehrsmanagement verbessert den Verkehrsfluss der Verkehrsmittel auf den Verkehrsinfrastrukturen.
- Optimierung des Fahrzeugbetriebs verringert die gefahrenen Kilometer und des Kraftstoff- bzw. Energieverbrauchs, z. B. durch eine optimierte Routenplanung, die Umwege und Staus vermeidet und auch die Typologie mitberücksichtigt.
- Fahrzeugseitige Emissionsminderung (Fahrzeugtechnik) umfasst alle Maßnahmen zur technischen Optimierung, um den spezifischen CO₂e-Ausstoß des Verkehrsmittels zu reduzieren.

Bisher wurden Ansatzpunkte vor allem im Verkehrsbereich verfolgt, die in der ■ Abb. 32.4 gelb eingefärbt sind. Die Kausalkette zeigt jedoch, dass Emissionsminderung im Verkehrsbereich deutlich vor dem Verkehr ansetzen muss und Entscheidungen der zentralen Akteure – etwa einzelner Personen, Unternehmen oder der öffentlichen Hand – adressieren muss, durch die Verkehrs- und Transportaufkommen und die zu überwindenden Distanzen und entstehenden Ressourcenverbräuche und Emissionen determiniert sind (Flämig 2012).

Der entscheidende Mechanismus zur Erreichung von Klimaschutzziele im Verkehr besteht in einer Doppelstrategie von Reduzierung der (motorisiert zurückgelegten) Verkehrsleistung und einer Verminderung der fahrzeugbezogenen Emissionen. Die Reduzierung der Verkehrsleistung kann durch Transport- und Verkehrsvermeidung sowie die Erhöhung der Auslastung erreicht werden. Die Reduzierung der fahrzeugbezogenen Emissionen erfordert die entsprechende Technik und der nutzungsbedingten Emissionen die Durchdringung der Fahrzeugflotte und auch eine Verkehrsoptimierung. Damit wird deutlich, dass Klimaschutz im Verkehr nur durch eine Kombination von technischen Innovationen, organisatorischer Optimierung und Verhaltensänderung zu erreichen ist.

32.5 Handlungsoptionen zur Reduzierung der Verkehrsleistung

Zur Emissionsminderung im Verkehrsbereich bestehen unterschiedliche Handlungsoptionen (vgl. z. B. auch Agora Verkehrswende 2018; UBA 2019b; Friedrich 2020).

Handlungsspielräume der Individuen bestehen in Entscheidungen über Wohnstandorte, Lebensstile, Aktivitätsorte, Autobesitz einschließlich Wahl der Antriebsart sowie der Verkehrsmittelentscheidung, aber auch über das Konsumverhalten (z. B. Einkaufsverhalten, Entsorgung, Retouren) mit Rückwirkungen auf die Güterverkehrsnachfrage.

Der Handlungsspielraum von Handel und Industrie liegt vor allem im Bereich der Standort- und Lagerhaltungspolitik, wodurch kurze Wege und gebündelte Transporte ermöglicht werden (Flämig 2014). Durch eine entsprechende Produkt- und Sortimentspolitik können Skaleneffekte durch die Bündelung von Transportmengen realisiert werden. Ein logistisch optimiertes Produktdesign kann die Auslastung der Transportmittel erhöhen. In der Beschaffungs- und Distributionspolitik können durch Wieder- und Weiterverwendungs- sowie durch Wieder- und Weiterverwertungsstrategien regionale Wirtschaftskreisläufe gefördert werden. Darüber hinaus haben die Produktions- und Logistikstrategien, also die Art und Weise der Steuerung der logistischen Ketten, einen entscheidenden Einfluss auf Art, Menge, Zusammensetzung und zurückzulegende Distanzen der zu transportierenden Güter (Löwa und Flämig 2011). Da die Geschäftsmodelle in der Regel relativ fix sind, sollten die Unternehmen dazu ermuntert werden, die operativen Effizienzgewinne durch die Reorganisation von Prozessen weiter zu forcieren, beispielsweise indem sie Transporte durch eine Qualitätsprüfung im Beschaffungsmarkt vermeiden oder die Ökologisierung

des Ausschreibungsverfahrens oder zumindest verkehrsökologisch optimieren. Unternehmen sind aber auch aufgefordert, durch ein betriebliches Mobilitätsmanagement den Berufs- und Kundenverkehr ökologisch mitzugestalten.

Der Handlungsspielraum der Logistikdienstleistungs- bzw. der Transport- und Verkehrsunternehmen umfasst die Vermeidung von Leerfahrten und die Realisierung von paarigen Verkehren, bei denen die Hin- und Rücktour ausgelastet ist, die Vermeidung von nicht voll ausgelasteten Transportgefäßen (z. B. von Lkw-Laderäumen oder Containern) oder von Umwegfahrten (Flämig 2014). Durch optimale Routen- und Tourenplanung sowie Fahrertraining lassen sich Fahrzeuge ökoeffizient nutzen. Handlungsspielraum besteht auch in der gemeinsamen technischen Optimierung der Aggregate (z. B. der Motoren und Antriebsstränge) mit den Herstellern (s. u.) sowie in Verlagerungsmaßnahmen von Lufttransporten auf die Kombination von See-Luft-Transporten (*Sea-Air*) oder nur auf See- oder Bahntransporte, von Lkw auf Bahn oder Binnenschiff, von motorisierten auf nichtmotorisierte Transportmittel.

Der Handlungsspielraum der Kommunen und Kreise besteht vor allem in der Verkehrs- und Stadtplanung. Die Option auf kurze Wege im Alltag setzt entsprechende langfristige Weichenstellungen bei der Flächenentwicklung voraus. Durch eine gezielte räumliche Entwicklung („Stadt der kurzen Wege“), mobilitätssensitive Standortentscheidungen und die Förderung regionaler Wirtschaftskreisläufe können strukturell die Voraussetzungen für die Reduzierung von Distanzen geschaffen werden. Um eine Verlagerung auf andere Verkehrsmittel (*modal shift*) erreichen zu können, ist eine Konzentration der Siedlungsentwicklung auf gut mit dem öffentlichen Verkehr bzw. mit dem Bahn- bzw. Wasserstraßennetz erschlossene Standorte notwendig. Die Förderung des nichtmotorisierten Verkehrs, des öffentlichen Verkehrs und deren inter- und multimodalen Vernetzung ist ein weiteres Kernelement der lokalen und regionalen Handlungsmöglichkeiten. Ergänzend dienen Maßnahmen der Verkehrsbeeinflussung, insbesondere der Verkehrsverflüssigung und des eher angebotsorientierten Mobilitätsmanagements.

Handlungserfordernisse auf der Ebene des Bundes und der Europäischen Union bestehen insbesondere in Rahmensetzungen, um den ökologischen Erneuerungsprozess des Wirtschafts- und Gesellschaftssystems zu beschleunigen. Dazu gehört vor allem die Harmonisierung der rechtlichen Grundlagen der einzelnen Verkehrsmittel sowie die Berücksichtigung von klimarelevanten Aspekten, wie sie z. B. im Raumordnungsgesetz bzw. Bundesbaugesetz verankert sind. Die Verabschiedung eines an u. a. Klimaschutzziele orientierten Mobilitätsgesetzes sowie eine grundlegende Reform der Bundesverkehrswegeplanung schaffen zudem

die Grundlagen für eine zukünftig konsistentere Umsetzungsstrategie.

Wichtige Bausteine einer nachhaltigen Verkehrsstrategie bilden darüber hinaus Richtlinien und Verordnungen in weiteren Handlungsfeldern, wie z. B. die Feinstaubrichtlinie oder die Grenzwertvorgaben für Abgasemissionen, aber auch produktbezogene Richtlinien und Verordnungen, wie z. B. das Produkthaftungsgesetz sowie die Bindung von Fördermitteln, etwa an die Einführung eines Umweltmanagementsystems. Große Bedeutung hat zudem die Sicherstellung einer verlässlichen und dauerhaften Finanzierung für den öffentlichen Verkehr. Gleichzeitig müssen aber auch Rahmensetzungen außerhalb des Verkehrsbereichs sowie gesellschaftliche und wirtschaftliche Entwicklungen auf ihre Verkehrswirksamkeit hin überprüft werden. Beispielsweise ist die weitere Durchdringung von Wirtschaft und Gesellschaft mit Informations- und Kommunikationstechnologien hinsichtlich ihrer verkehrlichen Konsequenzen bisher zu wenig untersucht und politisch flankiert.

Eine Umkehrung der Entwicklung dürfte nur bei einer deutlichen Erhöhung der Preise für Fortbewegung möglich sein. Als Anforderungen an preispolitische Maßnahmen gelten eine langfristige Festlegung mit wirkungsvollem Anstieg, die Gewährleistung der Zielerreichung der Maßnahmen sowie deren Verursacherprinzip sowie die Zweckbindung der zusätzlichen Einnahmen mit einer Regelung möglichst auf internationaler Ebene (Sammer 2020). Vorschläge für preispolitische Maßnahmen zur Reduzierung der THG-Emissionen sind u. a. ein Mobilitätsbonus (Sammer 2020) oder eine Zulassungssteuer (Friedrich 2020) mit Wirkung auf Pkw-Besitz und Fahrzeugtyp. Zudem sollen die EU-Vorgaben für die CO₂-Flottenziele für alle Fahrzeugklassen weiter verschärft werden. Auch steuerrechtliche Anpassungen, wie der Kfz-Steuer oder die Abschaffung von Dienstwagenprivileg und Entfernungspauschale, sind erforderlich.

32.6 Verkehrsmittelseitige CO₂e-Minderung

Bei der Suche nach möglichen Handlungsansätzen zur Reduzierung der verkehrsbedingten Klimafolgen sind auch fahrzeugseitige CO₂-Emissionsminderungsmaßnahmen von Bedeutung. Für deren Ausgestaltung spielt die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung eine wichtige Rolle, die Alternativen für Kraftstoffe, Antriebstechnologien und Infrastrukturen im Fokus hat. Dabei fließen derzeit viele Fördermittel in die Elektromobilität. Mit der Elektrifizierung von Fahrzeugen werden die CO₂e-Emissionen vom Betrieb auf die Energiebereitstellung verlagert, wobei die Treibhausgasneutralität die ausreichende

Verfügbarkeit von Strom aus erneuerbaren Energien voraussetzt (UBA 2013).

Die wirksame Reduzierung der fahrzeugbezogenen Emissionen erfordert ein Zusammenspiel zwischen:

- einer Energiewende,
- der Entwicklung und Produktion von elektrifizierten Antrieben bzw. von grünen Wasserstoff, Bio- und synthetischen Kraftstoffen (*e-fuels*) sowie Batterien und
- die Förderung einer möglichst raschen Durchdringung der neuen Technik im jeweiligen Segment.

Voraussetzung ist damit die Energiewende mit einer Stromerzeugung, die weitgehend erneuerbare Energien nutzt. Um diese Energiewende zu unterstützen, ist ein möglichst geringer Energieverbrauch im Verkehrssektor sowohl im Hinblick auf energieeffiziente Fahrzeuge als auch bei energiesparenden Verhalten erforderlich (Friedrich 2020). Noch ungelöst ist die energieintensivere Fahrzeugherstellung von batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV), bedingt durch die Batterieproduktion unter Einsatz Seltener Erden und Metalle. Insgesamt verursacht im Betrieb ein BEV im Verhältnis zu Fahrzeugen mit konventionellem Verbrennungsmotor (ICEV) über seine durchschnittliche Nutzungsdauer geringere Treibhausgase (Wietschel et al. 2019). Die CO₂e-Einsparung steigt, je kleiner die Batterie und je höher der Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung ist (Flämig et al. 2018).

Bei den Pkw sind der Umfang des zukünftigen Angebotes und die Preispolitik der BEV durch die Automobilhersteller schwierig abschätzbar. Es wird davon ausgegangen, dass sich bis zum Jahr 2025 sowohl bei den Reichweiten als auch bei den Preisen die jetzt noch vorhandenen Unterschiede zwischen Elektrofahrzeugen und Verbrennern annähern (z. B. Fraunhofer ISI 2020). Mit dem Rückgang der Kostendifferenz und der steigenden Verfügbarkeit von Ladeinfrastruktur wird eine Steigerung der Akzeptanz erwartet, sodass BEV in den kommenden Jahren zunehmend in der Lage sein werden, ICEV zu ersetzen. Allerdings liegt das durchschnittliche Alter der zugelassenen PKW bei 9,8 Jahren (KBA 2021a). Daher wird auch noch im Jahr 2030 ein sehr hoher Anteil von ICEV unterwegs sein, wenn keine restriktiven Maßnahmen ergriffen werden. International gibt es bereits eine Reihe von Ländern und Städten, die ab dem kommenden Jahrzehnt Verbote für den Verkauf bzw. Betrieb von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor beabsichtigen. In der EU gibt es hierzu bislang noch keine einheitliche Linie.

Die zukünftige technologische Entwicklung von LKW ist weniger eindeutig als die der PKW. Für Lkw bis 26 t zulässigem Gesamtgewicht (zGG) im Nah- und Regionalverkehr wird ebenfalls die Umstellung auf batterieelektrische Fahrzeuge erwartet. Die von der Nationalen Plattform Mobilität beim Verkehrs-

ministerium vorgelegte Hochlaufkurve für schwere Nutzfahrzeuge (SNF) geht von einer Technologieentscheidung und damit Antriebswende erst im Jahr 2025/26 aus (BMVI 2020). Vermutlich wird es in Abhängigkeit vom Einsatzfall verschiedene Technologien geben: elektrifizierte Oberleitungs-Lkw für Linienverkehre im Fernverkehr sowie Lkw mit grünem Wasserstoff, Bio- und synthetischen Kraftstoffen (*e-fuels*) in der Fläche.

Im Luftverkehr beschleunigt die Covid-19-Krise die Ausmusterung älterer und betriebskostenintensiver Flugzeugmodelle. Hierzu gehören insbesondere auch vierstrahlige Maschinen, deren Treibstoffverbrauch höher ist als von modernen zweistrahligen Jets. Da die erwartete Nachfrage und damit auch die zu erbringende Verkehrsleistung erst in den Jahren 2024 bis 2029 das Niveau des Jahres 2019 erreichen wird, besteht mit den nationalen und internationalen Verordnungen und Förderprogramme wie zum Beispiel dem europäische „*Green Deal*“ (Europäische Kommission 2020) der Rahmen und Anreize für die Einführung grüner Kraftstoffe. Dies gilt ebenso für den wasser gebundenen Transport.

Im Bahnverkehr ist bereits heute fast das gesamte Hauptnetz elektrifiziert und die Ausweitung auf das Nebennetz wird kontinuierlich vorangetrieben. Im Jahr 2017 wurden 98 % im Personenfernverkehr, 93 % im Güterverkehr und 83 % im Personennahverkehr der Verkehrsleistung elektrifiziert durchgeführt (Allianz pro Schiene 2021).

32.7 Anpassungsmaßnahmen an Folgen des Klimawandels im Verkehrsbereich

Wetterereignisse infolge des Klimawandels können den effizienten Betrieb der Verkehrsmittel, den Zustand der physischen Infrastruktur und den sicheren Transport von Gütern und Personen beeinflussen. Anpassungsnotwendigkeiten im Verkehrsbereich bestehen daher bei der Infrastruktur (Straßen, Bahnlinien, Wasserwegen), der Suprastruktur wie beispielsweise Umschlagterminalanlagen und im Betrieb (Michaelides et al. 2014; BMVI 2015).

Der Luft- und teilweise auch der Seeverkehr werden schon durch schwach ausgeprägte lokale Wetterphänomene im Ablauf gestört. Beispielsweise können Gewitter ein Umrouten auf See oder ein Umfliegen dieses Luftraums erzwingen. So ist im Luftverkehr das Wetter ein statistisch signifikanter Verursacher von Verspätungen (Eurocontrol 2013) und von Zwischenfällen oder Unfällen (EASA 2012).

Im Straßen- und Schienenverkehrsnetz ist davon auszugehen, dass die Instandhaltungserfordernisse zunehmen. Das Wasser- und das Schienennetz sind zwar

bei geringen Störungen zunächst wesentlich robuster als das Luft- und das Straßennetz, bei schweren Störungen wird jedoch zur Wiederherstellung deutlich mehr Zeit benötigt. Dabei sind der Bau und die Instandhaltung von Schienenwegen wesentlich teurer, und durch die höhere betriebliche Komplexität ist der Bahnverkehr von Störungen stärker betroffen als das Straßenverkehrssystem. Maßnahmen zur Gestaltung von Entwässerung und Hitzeabfuhr erfordern eine integrierte Betrachtungsweise von Stadt- und Infrastrukturplanung.

Nicht nur Schäden an der Verkehrsinfrastruktur, sondern auch Schäden an der Infrastruktur von Unternehmen sowie bei Zulieferern und Kunden können zu einer Unterbrechung der Produktion oder Dienstleistung führen und weitere unternehmerische Anpassungsmaßnahmen notwendig machen. Hier liefert die ISO-Norm 22301 „Managementsysteme für die Planung, Vorbereitung und operationale Kontinuität“ entsprechende Hinweise. Zur Sicherung der Versorgung sollten Unternehmen mit transportintensiven Wertschöpfungsketten ein Risikomanagement bzw. Betriebskontinuitätsmanagement nutzen und Lösungen implementieren, wie beispielsweise räumlich verteilte Beschaffungsstrategien oder synchronmodale Transportkettenstrategien, bei denen der Verkehrsträger zu jedem Zeitpunkt gewechselt werden kann.

Anpassungsmaßnahmen im Verkehrsbereich müssen daher vorrangig darauf abzielen, die Folgen von Ereignissen durch den Klimawandel zu verhindern oder zumindest zu mildern sowie die Systemkapazitäten möglichst schnell wiederherzustellen. Ziel ist es, die sogenannte Resilienz der Verkehrssysteme zu verbessern und deren Vulnerabilität zu reduzieren. Im **Bereich der Infrastrukturen** müssen beispielsweise die entsprechenden Planungs- und Baustandards in Abhängigkeit von der örtlichen Situation verändert werden. Für die Umsetzung der infrastrukturellen Anpassungsmaßnahmen sind **Änderungen des Planungs- und Baurechts** notwendig. **Transport- und Umschlagtechnologien** müssen vor allem konstruktiv angepasst werden. Darüber hinaus müssen Maßnahmen ergriffen werden, um den Betrieb aufrechterhalten zu können. Dabei spielt der Ausbau der Informations- und Frühwarnsysteme für die Entscheidungsfindung eine zentrale Rolle.

Das Risiko- und Krisenmanagement im Verkehrsbereich und in der Logistik ist weiter auszubauen und umfasst vorbereitende Maßnahmen sowie Maßnahmen während des Auftretens eines Wetterereignisses. Eine umfangreiche Übersicht über das Maßnahmenpektrum wurde im Projekt *Management of Weather Events in the Transport System* im 7. Rahmenprogramm der EU erarbeitet (MOWE-IT et al. 2014a–e). Aufgrund der hohen Investitionskosten und der langen Lebensdauer von Verkehrsinfrastrukturen über viele Jahr-

zehnte ist deren klimagerechte Gestaltung eine langfristige Aufgabe, bei der *No-regret*-Maßnahmen, vor allem vorsorgende Maßnahmen, die neben der THG-Minderung auch weitere Vorteile bieten, mehr Berücksichtigung finden sollten (IPCC 1995, S. 53). Da infrastrukturelle und betriebliche Entscheidungen häufig zusammenspielen, sind in die Maßnahmenumsetzung in den meisten Fällen sowohl die öffentliche Hand als auch Unternehmen einzubinden.

Bisher steht die systematische Formulierung und flächendeckende Umsetzung wirksamer Anpassungsmaßnahmen noch aus (UBA 2019a). Allerdings ist eine klimagerechte Gestaltung der Infrastrukturen nur sehr langfristig zu realisieren und muss im Rahmen von Reinvestitionszyklen mitgedacht werden, um noch höhere Folgeinvestitionen zu vermeiden. Notwendig bleiben zudem weitere Forschungsaktivitäten unter Einbindung der Infrastrukturbetreiber und Verkehrsunternehmen sowie der Transportnachfrager und der öffentlichen Hand. Gesucht ist eine gezielte Strategie, die Zusammenhänge aufzeigt, Handlungsempfehlungen formuliert und die Ausgestaltung von Finanzierungsinstrumenten konkretisiert. Im Mittelpunkt der infrastrukturellen Anpassungsmaßnahmen steht eine übergreifende Richtlinienarbeit, um die Voraussetzungen für deren standardisierte flächendeckende Umsetzung zu schaffen.

32.8 Kurz gesagt

Die Verkehrssysteme haben einen wesentlichen Anteil am menschengemachten Klimawandel. Zugleich werden sie durch Extremwetterereignisse und Wetterphänomene selbst in ihrer Funktionsfähigkeit eingeschränkt. Effizienz und Pünktlichkeit nehmen ab, Sicherheit und Zuverlässigkeit sind nicht mehr zwingend gegeben. Es kann zu Versorgungsengpässen kommen.

Seit dem Basisjahr 1990 haben die Personen- und Güterverkehrsleistung und deren Beitrag zum Klimawandel zugenommen. Ausnahmen bilden Jahre der Wirtschaftskrise und der Covid-19-Pandemie. Die Realisierung technischer und organisatorischer Maßnahmen zur Effizienzsteigerung konnte die absoluten induzierten negativen Klimaeffekte bislang nicht im notwendigen Umfang reduzieren. Weiterhin ansteigende Distanzen im Personen- und Güterverkehr stehen einer Senkung der verkehrsbedingten THG-Emissionen entgegen.

Notwendig ist die konsequente Vermeidung nicht notwendiger motorisierter Wege und die Verringerung der Distanzen zu Standorten für private oder wirtschaftliche Aktivitäten und fahrzeugbezogener Emissionen. Eine umfassende Umsetzung verkehrsreduzierender sowie -beeinflussender Maßnahmen ver-

ringert nicht nur Klimagase, sondern trägt zugleich zu einer Abnahme anderer negativer Verkehrsfolgen wie Lärm, Flächenversiegelung oder Unfällen bei. Auch die Zuverlässigkeit des Verkehrssystems wird dadurch erhöht. Klimaschutz leistet dann sowohl einen Beitrag zur Minderung der globalen Erwärmung als auch zur Verbesserung der Lebensqualität vor Ort und zur Reduzierung der Abhängigkeit des Verkehrssystems von fossilen Kraftstoffen. Dafür ist ein konsequentes Handeln zum Erreichen der Klimaschutzziele und ein vorausschauendes Agieren bei der Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen notwendig.

Literatur

- Agora Verkehrswende (2018) Klimaschutz im Verkehr: Maßnahmen zur Erreichung des Sektorziels 2030. ► https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/Klimaschutzszenarien/Agora_Verkehrswende_Klimaschutz_im_Verkehr_Massnahmen_zur_Erreichung_des_Sektorziels_2030.pdf. Zugegriffen: 1. Nov. 2021
- Allianz pro Schiene (2021) Elektrifizierung erklärt: Das Schienennetz muss unter Strom stehen. ► <https://www.allianz-pro-schiene.de/themen/infrastruktur/elektrifizierung-bahn/>. Zugegriffen: 6. Juni 2021
- Bauriedl S, Held M, Kropp C (2021) Große Transformation zur Nachhaltigkeit: Konzeptionelle Grundlagen und Herausforderungen, In: Hofmeister S, Warner B, Ott Z (Hrsg) Nachhaltige Raumentwicklung für die große Transformation – Herausforderungen, Barrieren und Perspektiven für Raumwissenschaften und Raumplanung, Verlag der ARL – Akademie für Raumentwicklung in der Leibniz-Gemeinschaft, Hannover, S 22–44. ► <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0156-1010028>
- Bergk F, Knörr W, Lambrecht U (2017) Klimaschutz im Verkehr: Neuer Handlungsbedarf nach dem Pariser Klimaschutzabkommen. Teilbericht des Projekts „Klimaschutzbeitrag des Verkehrs 2050“. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. UBA-Texte 45/2017. ► https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-07-18_texte_45-2017_paris-papier-verkehr_v2.pdf. Zugegriffen: 12. Juni 2021
- BMVI – Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2015) KLIWAS: Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland. Abschlussbericht des BMVI. Fachliche Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen des Forschungsprogramms KLIWAS. ► http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/WS/kliwas-abschlussbericht-des-bmvi-2015-03-12.pdf?__blob=publicationFile. Zugegriffen: 6. Apr. 2015
- BMVI – Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg) (2020) Gesamtkonzept klimafreundliche Nutzfahrzeuge. Mit alternativen Antrieben auf dem Weg zur Nullemissionslogistik auf der Straße. ► https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/gesamtkonzept-klimafreundliche-nutzfahrzeuge.pdf?__blob=publicationFile. Stand: November 2020. Zugegriffen: 6. Juni 2021
- BMVI – Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg) (2021) Verkehr in Zahlen 2020/2021. ► https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen-2020-pdf.pdf?__blob=publicationFile. Korrektur der PDF-Ausgabe: 13. April 2021. Zugegriffen: 6. Juni 2021
- Bundesregierung (2019) Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050. ► <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/974430/1679914/>

- e01d6bd855f09bf05cf7498e06d0a3ff/2019-10-09-klima-massnahmen-data.pdf?download=1. Zugegriffen: 21. Apr. 2022
- Council of the European Union (2021) Outcome of proceedings: proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulation (EU) 2018/1999 (European Climate Law) – Letter to the Chair of the European Parliament Committee on the Environment, Public Health and Food Safety (ENVI). (OR. en) Interinstitutional File:2020/0036(COD) Brüssel, 05.05.2021. ► <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-8440-2021-INIT/en/pdf>. Zugegriffen: 16. Juni 2021
- EASA – European Aviation Safety Agency (2012) Annual safety review 2011. European Aviation Safety Agency, Köln. ► <http://easa.europa.eu/newsroom-and-events/general-publications/annual-safety-review-2011>. Zugegriffen: 22. Nov. 2014
- Eurocontrol – European organisation for the safety of air navigation (2013) Challenges of growth 2013. ► <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/content/documents/official-documents/reports/201307-challenges-of-growth-summary-report.pdf>. Zugegriffen: 2. Apr. 2014
- Eurocontrol – Aviation intelligence unit (2021) What Covid-19 did to European aviation in 2020 and outlook 2021, Think Paper #8, 1. January 2021. ► <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2021-02/eurocontrol-think-paper-8-impact-of-covid-19-on-european-aviation-in-2020-and-outlook-2021.pdf>. Zugegriffen: 18. Jan. 2021
- Europäische Kommission (2020) Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates zur Schaffung des Rahmens für die Verwirklichung der Klimaneutralität und zur Änderung der Verordnung (EU) 2018/1999 (Europäisches Klimagesetz). COM/2020/80 final, Brüssel 04.03.2020. ► <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020PC0080&from=DE>. Zugegriffen: 8. Juli 2021
- Flämig H (2011) 2.4.7.1 Aufgaben des Güterverkehrs in Städten und Regionen. In: Bracher T, Haag M, Holzapfel H, Kiepe F, Lehmbrock M, Reutter U (Hrsg) Handbuch der kommunalen Verkehrsplanung. 62. Ergänzungslieferung 12/11, S 1–21
- Flämig H (2012) Die Krux mit der Logistik. Ökologisches Wirtschaft 2(B27):24–25
- Flämig H (2014) Logistik und Nachhaltigkeit. In: Heidbrink L, Meyer N, Reidel J, Schmidt I (Hrsg) Corporate Social Responsibility in der Logistikbranche – Anforderungen an eine nachhaltige Unternehmensführung. Schmidt, Berlin, S 25–44
- Flämig H, Yasin E, Fieltsch P, Matt C, Rosenberger K, Steffen M, Trümper SC, Wolff W (2018) Wirtschaft am Strom: Beschreibung des Hamburger Wirtschaftsverkehrs durch Fahr- und Energiedaten von Fahrzeugen < 3.5 Tonnen: BEV, PHEV und ICEV. ECTL Working Paper 50A. Fahrdatenanalyse; BMVI-FKZ 03EM0201B. Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburg
- Fraunhofer ISI (Hrsg) (2020) Batterien für Elektroautos: Faktencheck und Handlungsbedarf. Policy Brief Karlsruhe, Januar 2020. ► <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/2020/Faktencheck-Batterien-fuer-E-Autos.pdf>. Zugegriffen: 12. Juni 2021
- Friedrich M (2020) Instrumente und Maßnahmen für eine Verkehrswende – Was bringt wieviel für die Klimaziele? Straßenverkehrstechnik H 12(2020):832–844
- Hagen T, Sunder M, Lerch E, Siavash S (2020) Verkehrswende trotz Pandemie? Mobilität und Logistik während und nach der Corona-Krise. Frankfurt University of Applied Science, Frankfurt a. M. 21.09.2020. ► https://www.frankfurt-university.de/fileadmin/standard/Hochschule/Fachbereich_1/FFin/Neue_Mobilitaet/Veroeffentlichungen/2020/Corona_und_Mobilitaet_20200922_final.pdf
- Holz-Rau C (2019) CO₂-Bepreisung und Entfernungspauschale – Die eingebildete Steuererhöhung. Int Verkehrswesen 71(4):10–11
- Holz-Rau C, Scheiner J (2020) Mobilität und Raumentwicklung im Kontext des gesellschaftlichen Wandels – Schlussfolgerungen für Politik, Planungspraxis und Forschung. In: Reutter U, Holz-Rau C, Albrecht J, Hülz M (Hrsg) (2020) Wechselwirkungen von Mobilität und Raumentwicklung im Kontext gesellschaftlichen Wandels. Forschungsberichte der ARL14, Hannover
- IPCC – Intergovernmental panel on climate change (1995) IPCC second assessment – climate change 1995. A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. ► <https://www.ipcc.ch/pdf/climate-changes-1995/ipcc-2nd-assessment/2nd-assessment-en.pdf>. Zugegriffen: 6. Juni 2014
- KBA – Kraftfahrt-Bundesamt (2021a) Bestand in den Jahren 1960 bis 2021 nach Fahrzeugklassen. ► https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/FahrzeugklassenAufbauarten/fz_b_fzkl_aufb_archiv/2021a/b_fzkl_zeitreihe.html?nn=2598042. Zugegriffen: 6. Juni 2021
- Kraftfahrt-Bundesamt KBA (2021b) Fahrzeugzulassungen (FZ). Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen. 01. Januar 2021 (FZ13), Flensburg. ► https://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2021/fz13_2021.pdf?__blob=publicationFile&v=3. Zugegriffen: 16. Juni 2021
- Löwa S, Flämig H (2011) Integration of logistics strategies in urban transport models. Conference proceedings, 4th METRANS National Urban Freight Conference 2011, Long Beach (USA). ► http://www.metrans.org/nuf/2011/documents/Papers/Lowa-Flamig-integration_paper_revised.pdf. Zugegriffen: 20. Febr. 2014
- Michaelides S, Leviakangas P, Doll C, Heyndrickx C (2014) Forward: EU-funded projects on extreme and high-impact weather challenging European transport systems. Nat Hazards 5–22. ► <https://doi.org/10.1007/s11069-013-1007-1>
- MOWE-IT, Temme A, Kreuz M, Mühlhausen T, Schmitz R, Hyvärinen O, Kral S, Schätter F, Bartsch M, Michaelides S, Tymvios F, Papadakis M, Athanasatos S (2014a) Guidebook for enhancing resilience of European air traffic in extreme weather events. ► http://www.mowe-it.eu/wordpress/wp-content/uploads/2013/02/Mowe_it_Guidebook_Air_transport.pdf. Zugegriffen: 12. Juni 2014
- MOWE-IT, Siedl N, Schweighofer J (2014b) Guidebook for enhancing resilience of European inland waterway transport in extreme weather events. ► http://www.mowe-it.eu/wordpress/wp-content/uploads/2013/02/Move_it_Guidebook_IWT.pdf. Zugegriffen: 12. Juni 2014
- MOWE-IT, Volodymyr G, Nazarenko K, Nekkala M, Hutchinson P, Kopsala P, Michaelides S, Tymvios F, Papadakis M, Athanasatos S (2014c) Guidebook for enhancing resilience of European maritime transport in extreme weather events. ► http://www.mowe-it.eu/wordpress/wp-content/uploads/2013/02/Mowe_it_Guidebook_maritime_transport.pdf. Zugegriffen: 12. Juni 2014
- MOWE-IT, Jaroszweski D, Quinn A, Baker C, Hooper A, Kochsiek J, Schultz S, Silla A (2014d) Guidebook for enhancing resilience of European railway transport in extreme weather events. ► http://www.mowe-it.eu/wordpress/wp-content/uploads/2013/02/Move_it_Guidebook_Rail_transport.pdf. Zugegriffen: 12. Juni 2014
- MOWE-IT, Doll C, Kühn A, Peters A et al (2014e) Guidebook for enhancing resilience of European road transport in extreme weather events. ► http://www.mowe-it.eu/wordpress/wp-content/uploads/2013/02/MOVE-IT_road_guidebook_final.pdf. Zugegriffen: 12. Juni 2014
- Nobis C, Kuhnimhof T (2018) Mobilität in Deutschland – MiD Ergebnisbericht. Studie von infas, DLR, IVT und infas 360 im Auftrag des Bundesministers für Verkehr und digitale Infrastruktur (FE-Nr. 70.904/15). Bonn, Berlin. ► http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/MiD2017_Ergebnisbericht.pdf. Zugegriffen: 12. Juni 2021
- Öko-Institut (2013) Treibhausgas-Emissionen durch Infrastruktur und Fahrzeuge des Straßen-, Schienen- und Luftverkehrs sowie der Binnenschifffahrt in Deutschland. Arbeitspaket 4 des Projektes

- Weiterentwicklung des Analyseinstrumentes Renewability. UBA-Texte, Bd 96. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. ► https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/texte_96_2013_treibhausgasemissionen_durch_infrastruktur_und_fahrzeuge_2015_01_07.pdf. Zugegriffen: 12. Juni 2021
- Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2021) Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann, Studie im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende
- Sammer G (2020) Ökologische Reform der Steuern, Gebühren und staatlichen Ausgaben für den Verkehrs- und Mobilitätssektor – eine Diskussionsgrundlage. Straßenverkehrstechnik H 12(2020):832–844
- Schelewsky, M, Follmer, R, Dickmann, C (2020) CO₂-Fußabdrücke im Alltagsverkehr. Datenauswertung auf Basis der Studie Mobilität in Deutschland. Umweltbundesamt Texte 224/2020
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2018) Wachsende Motorleistung der Pkw führt zu steigenden CO₂-Emissionen. Pressemitteilung Nr. 459 vom 26. November 2018. ► https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2017/11/PD18_459_85.html. Zugegriffen: 1. Nov. 2021
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2021a) Nachhaltige Entwicklung in Deutschland – Daten zum Indikatorenbericht 2021. April 2021. ► <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Nachhaltigkeitsindikatoren/Publikationen/Downloads-Nachhaltigkeit/indikatoren-0230001219004.html>. Zugegriffen: 12. Juni 2021
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2021b) Fahrgastzahl im Linienfernverkehr mit Bahnen und Bussen im Jahr 2020 halbiert. Pressemitteilung Nr. 172 vom 8. April 2021. ► https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021a/04/PD21_172_461.html?sessionId=5F8F0C61945E44005B2587E021385327.live732. Zugegriffen: 6. Juni 2021
- TREMOM – Transport Emission Model (2019) Version 6.16. ► <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/treibhausgas-emissionen/emissionsquellen#energie-stationar>
- UBA – Umweltbundesamt (2013) Emissionen der sechs im Kyoto-Protokoll genannten Treibhausgase in Deutschland nach Quellkategorien in Tsd. t Kohlendioxid-Äquivalenten. ► http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/8_tab_thg-emi-quellkat_2013-10-02_neu.pdf. Zugegriffen: 20. Febr. 2014
- UBA – Umweltbundesamt (2019a) Kein Grund zur Lücke. So erreicht Deutschland seine Klimaschutzziele im Verkehrssektor für das Jahr 2030. Stand: Juni 2019. ► https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/19-12-03_uba_pos_kein_grund_zur_luecke_bf_0.pdf. Zugegriffen: 31 Okt. 2021
- UBA – Umweltbundesamt (2019b) Monitoringbericht 2019 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung. ► https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/das_monitoringbericht_2019_barrierefrei.pdf. Zugegriffen: 3. Juni 2021
- UBA – Umweltbundesamt (2021) Jährliche Treibhausgas-Emissionen in Deutschland/Annual greenhouse gas emissions in Germany. ► https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/bilder/dateien/2021-03-15_thg_crf_plus_1a_details_ci_1990-2019_vjs2020.pdf. Zugegriffen: 8. Juli 2021
- Wietschel M, Kühnbach M, Rüdiger D (2019) Die aktuelle Treibhausgasemissionsbilanz von Elektrofahrzeugen in Deutschland. In Leibniz-Informationszentrum Wirtschaft Working Paper No. S02/2019, Karlsruhe. ► https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/sustainability-innovation/2019/WP02-2019_Treibhausgasemissionsbilanz_von_Fahrzeugen.pdf. Zugegriffen: 2. Juni 2021

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (► <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

