



Ariadne-Report

Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045

Szenarien und Pfade im Modellvergleich

KOPERNIKUS
Ariadne **PROJEKTE**
Die Zukunft unserer Energie

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Der vorliegende Ariadne-Report wurde von den oben genannten Autorinnen und Autoren des Ariadne-Konsortiums ausgearbeitet. Er spiegelt nicht zwangsläufig die Meinung des gesamten Ariadne-Konsortiums oder des Fördermittelgebers wider. Die Inhalte der Ariadne-Publikationen werden im Projekt unabhängig vom Bundesministerium für Bildung und Forschung erstellt.

Herausgegeben von

Kopernikus-Projekt Ariadne
Potsdam-Institut für Klimafolgen-
forschung (PIK)
Telegrafenberg A 31
14473 Potsdam

Oktober 2021

DOI: [10.48485/pik.2021.006](https://doi.org/10.48485/pik.2021.006)

Bildnachweise

Titel: Yeshi Kangrangz / Unsplash; Kapitel 1: Andrea Boldizsar / Unsplash; Kapitel 2: funky-data / iStock; Kapitel 3: Julian Hochgesang / Unsplash; Kapitel 4: Robin Sommer / Unsplash; Kapitel 5: hungyifei / iStock; Kapitel 6: audioundwerbung / istock; Kapitel 7: Clint Adair / Unsplash; Kapitel 8: Adam Vradenburg / Unsplash; Kapitel 9: Dan Meyers / Unsplash; Kapitel 10: Micheile Henderson / Unsplash

2. Verkehr

2.1	Zusammenfassung	62
2.2	Die Verkehrswende im Systemkontext	62
2.3	Modellierung der Verkehrswende	64
2.3.1	<i>Eingesetzte Modelle</i>	64
2.3.2	<i>Zusammenfassung wichtiger Annahmen für das Leitmodell</i>	65
2.4	Verkehr, Energie und CO ₂ -Emissionen in den Technologiepfaden	66
2.4.1	<i>Entwicklung der Verkehrsnachfrage bis 2045</i>	66
2.4.2	<i>Entwicklung der Pkw- und Lkw-Flotten bis 2045</i>	68
2.4.3	<i>Endenergienachfrage</i>	73
2.4.4	<i>CO₂-Emissionen</i>	76
2.4.5	<i>Potenziale und Grenzen der direkten Elektrifizierung</i>	79
2.4.6	<i>Einsatzbereiche für Wasserstoff</i>	81
2.4.7	<i>Einsatzbereiche für E-Fuels</i>	81
2.5	Prioritäten für den Zeithorizont 2030	82
2.6	Besonders wichtige Instrumente für die Erreichung des 2045-Ziels	83
2.7	Fazit	84
	Literaturangaben	85

Autorinnen und Autoren

Florian Koller, Christian Winkler, Gernot Liedtke, Ines Österle, Tudor Mocanu, Dennis Seibert, Özcan Deniz, Tilman Matteis, Moritz Bergfeld, Vera Sehn, Felix Kattelman, Markus Haun, Alois Dirnaichner



2.1 Zusammenfassung

Bis zum Jahr 2030 hat die direkte Elektrifizierung das größte Treibhausgas-(THG)-Emissionsminderungspotenzial im Verkehrssektor. Da für Pkw und teilweise auch für die Lkw schon jetzt kommerziell wettbewerbsfähige und technisch ausgereifte batterieelektrische Lösungen verfügbar sind, können sich kurzfristige Dekarbonisierungsanstrengungen auf diese Segmente konzentrieren.

Selbst mit einem massiven Anstieg des Anteils batterieelektrischer Fahrzeuge werden die Sektorziele aus dem Bundes-Klimaschutzgesetz bis zum Jahr 2030 nicht erreicht und müssen entsprechend von anderen Sektoren kompensiert werden. Die kurzfristigen Minderungspotenziale durch eine reine Antriebswende sind durch die Langlebigkeit der fossilen Bestandsfahrzeuge begrenzt. Selbst bei einer deutlichen Kostendegression von batterieelektrischen Fahrzeugen, sehr schnellem Ladeinfrastrukturausbau und hohen CO₂-Preisen werden kurzfristig zusätzliche Maßnahmen erforderlich sein, um das Verkehrssektor-Ziel im Jahr 2030 zu erreichen. Hierfür kommen vor allem Maßnahmen zur Änderung des Mobilitätsverhaltens, wie der Wechsel auf andere Verkehrsträger, in Frage.

Die indirekte Elektrifizierung (Nutzung der Energieträger Wasserstoff und E-Fuels) bildet bis zum Jahr 2045 in Teilbereichen des Güter-, Personenschienen- und Busverkehrs sowie für den Flugverkehr eine sinnvolle und für Verbrenner-Restbestände bei den Pkw eine notwendige Alternative zur direkten Elektrifizierung. Die Nutzung dieser Energieträger erfordert jedoch im Vergleich zur direkten Elektrifizierung einen erheblich größeren Einsatz an Energie, insbesondere erneuerbarem Strom.

2.2 Die Verkehrswende im Systemkontext

Das vorliegende Kapitel beschreibt die Umsetzung von vier möglichen Technologiepfaden (vgl. Abschnitt 1.2) zum Erreichen von null Treibhausgas-Emissionen im Verkehrssektor bis zum Jahr 2045. Die Umsetzung dieser Technologiepfade ohne weitere komplementäre Maßnahmen entspricht der so genannten Antriebswende, das heißt einer Umstellung auf klimaneutrale Energieträger bei unveränderten Mobilitätsmustern. Als alternative Energieträger werden betrachtet: Strom aus Erneuerbaren Energien (direkte Elektrifizierung) sowie grüner Wasserstoff und aus grünem Wasserstoff hergestellte synthetische Kraftstoffe, im Folgenden E-Fuels genannt (beide

indirekte Elektrifizierung). Ein besonderer Fokus liegt auf der Erreichung des sektoralen Minderungsziels für das Jahr 2030, so wie es im aktualisierten Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG, 2021) festgelegt ist.

Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor

Als wichtiger Referenzwert des in Deutschland direkt im Verkehrssektor emittierten Treibhausgases (THG) gilt in Folge des so genannten Kyoto-Protokolls die THG-Emissionen des Jahres 1990 von insgesamt 164 Mt (vgl. UBA, 2021a).

Bis zum Jahr 2045 soll der Verkehrssektor in Deutschland THG-neutral sein. Für den Weg dorthin wurden jüngst neue Zwischenziele vereinbart und verbindlich im novellierten Bundes-Klimaschutzgesetz festgelegt (KSG, 2021). Im Vergleich zur Referenz dürfen im Jahr 2030 nur noch 52 %, das heißt 85 Mt an THG-Emissionen, ausgestoßen werden. Nach dem Energiewirtschaftssektor ist der Verkehrssektor somit der Sektor, in dem bis 2030 die größte prozentuale Emissionsminderung erreicht werden muss. Weitere konkrete Zielwerte für die Zeit nach 2030 werden im Jahr 2024 festgelegt.

Die bisherige Entwicklung im Zeitraum von 1991 bis 2019 zeigt, dass sich die sektoralen THG-Emissionen mindestens auf den Referenzanstoß des Jahres 1990 beliefen. Ausnahme bildet der Zeitraum von 2005 bis 2015 mit einem mittleren Ausstoß von 156 Mt. Seit 1990 fand demnach keine relative Reduktion des Ausstoßes statt. Im Mittel ist der Ausstoß seit 1990 sogar leicht gestiegen (167 Mt; UBA, 2021a). Zum Vergleich: Die THG-Emissionen über alle Sektoren in Deutschland hinweg sind im selben Zeitraum um 35 % zurückgegangen.

Die über die Jahre stagnierenden Emissionen im Verkehrssektor resultieren aus zwei gegenläufigen Trends in den beiden wichtigen Segmenten Pkw und Lkw. Zwar konnten Effizienzgewinne bei Pkw-Antrieben die spezifischen Emissionen, das heißt die Emissionen pro Kilometer, im Zeitraum von 1995 bis 2019 um 5 % zu senken. Im Gegenzug sind die Nachfrage im motorisierten Individualverkehr um 20 % von 743 Mrd. auf 917 Mrd. Personenkilometer (BMVBW, 2000; BMVI, 2021; UBA, 2021c) und dadurch die THG-Emissionen der Pkw-Flotte um 5 % gestiegen. Im straßengebundenen Güterverkehr stiegen die THG-Emissionen bis 2019 trotz einer Senkung der spezifischen Emissionen durch Effizienzgewinne (-32 %) insgesamt sogar um 21 % gegenüber 1995. Der Anstieg resultierte aus einer Steigerung der Transportnachfrage im Zeitraum von 1995 bis 2019 um 78 % von 280 Mrd. auf 499 Mrd. Tonnenkilometer (UBA, 2021c).

Im Jahr 2019 hatte der Verkehrssektor folglich einen Anteil von 20 % am in Deutschland direkt emittierten Treibhausgas. Insgesamt betragen die sektoralen THG-Emissionen im Jahr 2019

164 Mt, davon 162 Mt CO₂ (UBA, 2021a). Der größte Anteil dieses Ausstoßes (ca. 62 %) wurde durch den motorisierten Individualverkehr verursacht (ca. 100 Mt). Der straßengebundene Güterverkehr trug etwa 50 Mt CO₂ bei (UBA, 2021d). Die verbleibenden Emissionen (etwa 11 Mt) entfielen auf den öffentlichen Personenverkehr mit Bus und Bahn, den schienen- und wasserstraßengebundenen Güterverkehr sowie innerdeutsche Flüge. Aufgrund der quantitativen Dominanz von Pkw und Lkw an den THG-Emissionen werden im Folgenden vorrangig Emissionsminderungspotenziale im motorisierten Straßenverkehr betrachtet.

Box: THG-Emissionen im Jahr 2020 – Corona-Pandemie

Bedingt durch die Corona-Pandemie konnte 2020 das Sektor-Ziel einer 8,5-prozentigen Reduktion gegenüber 1990 auf 150 Mt (KSG, 2021) mit einer tatsächlichen Minderung von 11,4 % eingehalten bzw. sogar übererfüllt werden. Im Jahr 2021 dürften auf dem von der Bundesregierung beschlossenen Klimapfad aber erneut nur um 11,6 % verminderte THG-Emissionen (145 Mt) gegenüber 1990 ausgestoßen werden. Wahrscheinlich ist jedoch, dass die THG-Emissionen im Vergleich zu 2020 aufgrund steigender Absätze fossiler Brennstoffe wieder deutlich steigen und das Ziel für 2021 nicht eingehalten wird (Hein et al., 2021). Die Pandemiesituation hat demnach nur einen Einmal-Effekt.

2.3 Modellierung der Verkehrswende

2.3.1 Eingesetzte Modelle

Als Leitmodell zur Analyse des Energiebedarfs und der CO₂-Emissionen im Verkehrssektor dient eine Kopplung aus verschiedenen Modellen des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR). Das Vehicle Technology Scenario Model (VECTOR21) des DLR-Instituts für Fahrzeugkonzepte simuliert den Hochlauf alternativer Antriebstechnologien im deutschen Pkw- und Lkw-Markt. Das Deutschlandmodell (DEMO) des DLR-Instituts für Verkehrsforschung – ein räumlich hoch aufgelöstes, multimodales Verkehrsmodell – prognostiziert die Verkehrsnachfrage für alle Verkehrsträger im Personenverkehr, ein zusätzliches Zeitreihenmodell die Transportnachfrage im Güterverkehr. Die Modelle beziehen sowohl zukünftig veränderte Rahmenbedingungen, wie ökonomische oder technische Entwicklungen, soziale Trends und verkehrspolitische Maßnahmen zur Zielerreichung im Jahr 2045 als auch deren Einfluss auf empirisch fundierte Präferenzen, das Konsum- (z. B. Fahrzeugkauf) und Mobilitätsverhalten (z. B. Verkehrsmittel- und Zielwahl) von Verbraucherinnen und Verbrauchern ein. Daneben kommen

Kohorten-Modelle zur Entwicklung des Bestands hinzu, welche die Brücke zwischen Neufahrzeugverkäufen und der Nutzung von Fahrzeugen schlagen. Diese Logik gilt sowohl für Pkw als auch für Lkw. Aufbauend auf den Modellergebnissen werden Energienachfrage und Emissionen mittels prognostizierter spezifischer Emissions- und Energieverbrauchsfaktoren berechnet (für Details siehe auch Appendix dieses Berichts).

Zusätzlich liefern die Gesamtsystemmodelle REMIND-EU (PIK), TIMES Pan-EU (IER) sowie REMod (Fraunhofer-ISE) Vergleichsdaten für den Verkehrssektor. Bei ihnen handelt es sich um sog. strategische Optimierungsmodelle, die gesamtwirtschaftlich, das heißt unter Wohlfahrtsgesichtspunkten, optimale Investitionspfade unter Berücksichtigung eines noch verfügbaren CO₂-Budgets bis 2045 für *alle* Sektoren berechnen. Dabei bieten diese Modelle die zusätzliche Option an, Strom und Wasserstoff auch aus dem Ausland zu beziehen (siehe Abschnitt 1.2). Sie bilden keine Änderung expliziter verkehrspolitischer Rahmenbedingungen ab.

2.3.2 Zusammenfassung wichtiger Annahmen für das Leitmodell

Für alle Technologiepfade (siehe Abschnitt 1.2) werden in den DLR-Modellierungen ein steil ansteigender CO₂-Preispfad (reale Werte für 2025: 100 Euro/tCO₂, 2030: 200 Euro/t, 2045: 500 Euro/t, (vgl. Diskussion zu Grenzvermeidungskosten der Gesamtsystemmodelle in der Box in Abschnitt 1.2)) und für das Jahr 2030 um gegenüber 2021 50 % reduzierte Flottengrenzwerte (CO₂-Standards) für Pkw und 31 % reduzierte Flottengrenzwerte für Lkw angenommen.

Die drei Szenarien mit spezifischer Technologieausrichtung unterscheiden sich im Hinblick auf folgende Annahmen in der DLR-Modellierung besonders: Das *Elektrifizierungs*-Szenario priorisiert die direkte Elektrifizierung. Beispielsweise wird im Vergleich zu den anderen Technologiepfaden eine deutlich schnellere Kostendegression der Batterietechnik (gegenüber heute um 55 % bis 2030) angenommen und ein deutlich schnellerer Ausbau der Ladeinfrastruktur unterstellt (sehr schneller Ausbau bis 2025, abgeschlossen in 2030). Außerdem sinken perspektivisch die realen Stromkosten (um 20 % bis 2045). Das *Wasserstoff*-Szenario geht von einer deutlichen Kostendegression der Brennstoffzellen (gegenüber heute um 80 % bis 2030) und dem schnellen Ausbau der nötigen Tankstelleninfrastruktur aus (bis 2035 abgeschlossen). Im *E-Fuels*-Szenario spielen E-Fuels eine größere Rolle und ersetzen schneller fossile Kraftstoffanteile (2030 Beimischungsquote von 10 %, 2040 bereits rund 90 %). Zudem können Fahrzeughersteller abgesetzte Verbrennerfahrzeuge zu einem Teil auf die CO₂-Flottengrenzwertziele anrechnen lassen, wenn sie z. B. für diese Fahrzeuge entsprechend CO₂-Zertifikate für E-Fuels erworben haben. Das

Technologiemix-Szenario priorisiert keinen der drei Energieträger in besonderem Maße zusätzlich. Eine Annahmen-Übersicht der modellierten Szenarien befindet sich in Kapitel 1.

Wichtig: Bei der Betrachtung der Modellergebnisse für den Verkehrssektor ist zu beachten, dass die direkten CO₂-Emissionen aus der Nutzung von E-Fuels nicht dem Verkehrssektor zugeschlagen werden, da angenommen wird, dass der Kohlenstoff zur Synthese der E-Fuels aus der Atmosphäre entnommen wird, und sie somit CO₂-neutral sind. Die Bilanzierung entspricht der heutigen Bilanzierung von Biokraftstoffen (= biogene Bilanzierung). Des Weiteren bilden die Ergebnisse für das Jahr 2020 nicht den Einmal-Effekt der Corona-Pandemie ab.

2.4 Verkehr, Energie und CO₂-Emissionen in den Technologiepfaden

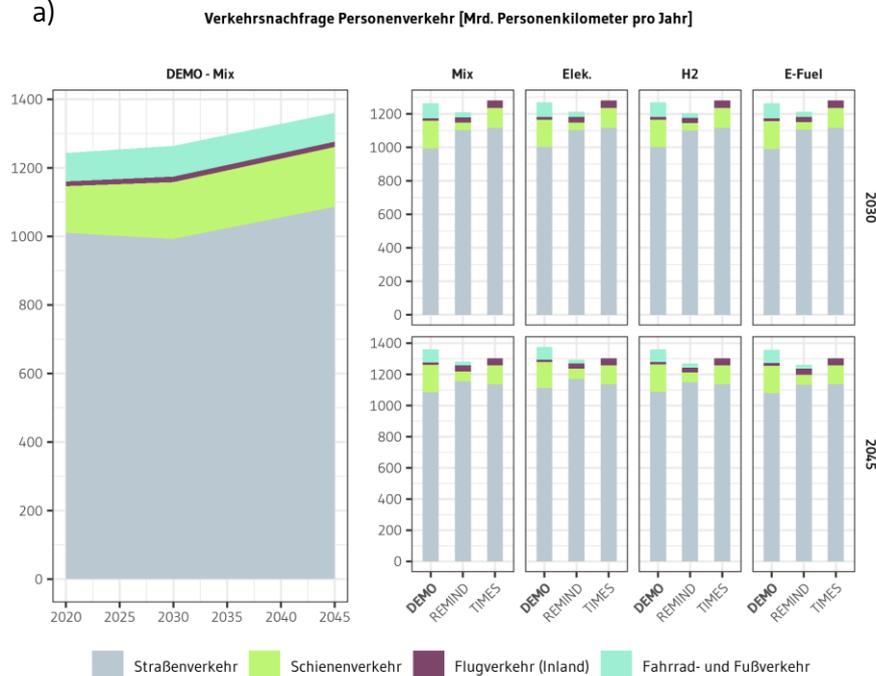
2.4.1 Entwicklung der Verkehrsnachfrage bis 2045

Bis zum Jahr 2045 prognostiziert DEMO eine steigende Verkehrsnachfrage bis auf etwa 1400 Mrd. Personenkilometer im Personenverkehr und etwa 900 Mrd. Tonnenkilometer im Güterverkehr (siehe Abbildung 2.1). Ein wichtiger Treiber dabei ist das prognostizierte Wirtschaftswachstum (Bruttoinlandsprodukt). Die Verkehrsnachfrage steigt selbst dann, wenn das vorhergesehene Wirtschaftswachstum weniger transportintensiv ausfällt (Annahme für TIMES). In REMIND steigt die Nachfrage im Güterverkehr nicht wie in den anderen beiden Modellen, da die Marktdurchdringung klimaneutraler Technologien mittelfristig in REMIND nicht mit der von der CO₂-Preisentwicklung getriebenen Kraftstoffpreisentwicklung Schritt halten kann.

Bezüglich der Aufteilung auf die Verkehrsträger werden weder im Personen- noch im Güterverkehr nennenswerte Änderungen im Vergleich zur heutigen Situation vorhergesagt. Grund ist, dass gegenüber aktuell absehbaren Entwicklungen keine weiterreichenden Maßnahmen angenommen wurden, die eine Verkehrsverlagerung auf andere Verkehrsträger (z. B. Schiene) fördern. Im Personenverkehr wird in allen Szenarien von einer leichten Beschleunigung des öffentlichen Verkehrs und einer Verteuerung des Luft- und Pkw-Verkehrs (über Parkkosten) ausgegangen. Die durchschnittlichen Energiekosten für den Betrieb von Pkw und Lkw ergeben sich aus dem Antriebsmix (siehe nachfolgende Abschnitte) sowie aus den Kosten für die jeweiligen Energieträger. Hier wird bis 2030 ein starker Anstieg prognostiziert, für Pkw z. B. von 8 ct/km im Jahr 2020 auf 15 ct/km im *Technologiemix*-Szenario. Diese steile initiale Entwicklung ergibt sich aus dem schnellen Anstieg des CO₂-Preises auf fossile Brennstoffe. Mit steigendem Anteil von E-Pkw in der Flotte sinken die Energiekosten ab 2030 wieder, für Pkw auf zwischen 9 ct/km im *Elektrifizierungs*-Szenario und 11 ct/km im *E-Fuels*-Szenario. Im Güterverkehr gilt analog, dass die

steigenden realen Transportkosten auf der Straße aufgrund der zum Anfang teureren E-Fuels und des CO₂-Preises ein gewisser, allerdings übersichtlicher Verkehrsträgerwechsel auf die Bahn prognostiziert wird. Diese unterstellte Entwicklung der Energiekosten erklärt somit den zunächst leicht sinkenden bzw. langsamer steigenden Verlauf der Pkw- und Lkw-Verkehrsleistung in Abbildung 2.1.

a)



b)

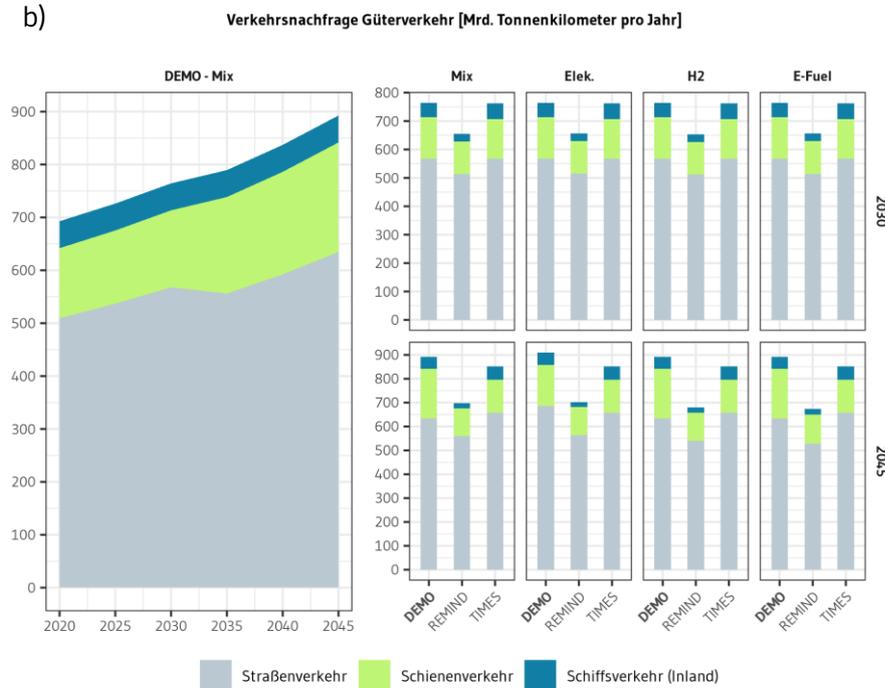


Abbildung 2.1: Entwicklung der Verkehrsnachfrage im a) Personen- und b) Güterverkehr in den Technologiepfaden bis 2045.

2.4.2 Entwicklung der Pkw- und Lkw-Flotten bis 2045

Pkw-Segment

Bis zum Jahr 2045 steigt die Zahl an zugelassenen Pkw in allen Technologiepfaden der Simulation mit dem Modell VECTOR21 leicht, vor allem getrieben durch eine positive Einkommensentwicklung und deren Effekt auf die Pkw-Dichte (siehe Abbildung 2.2).

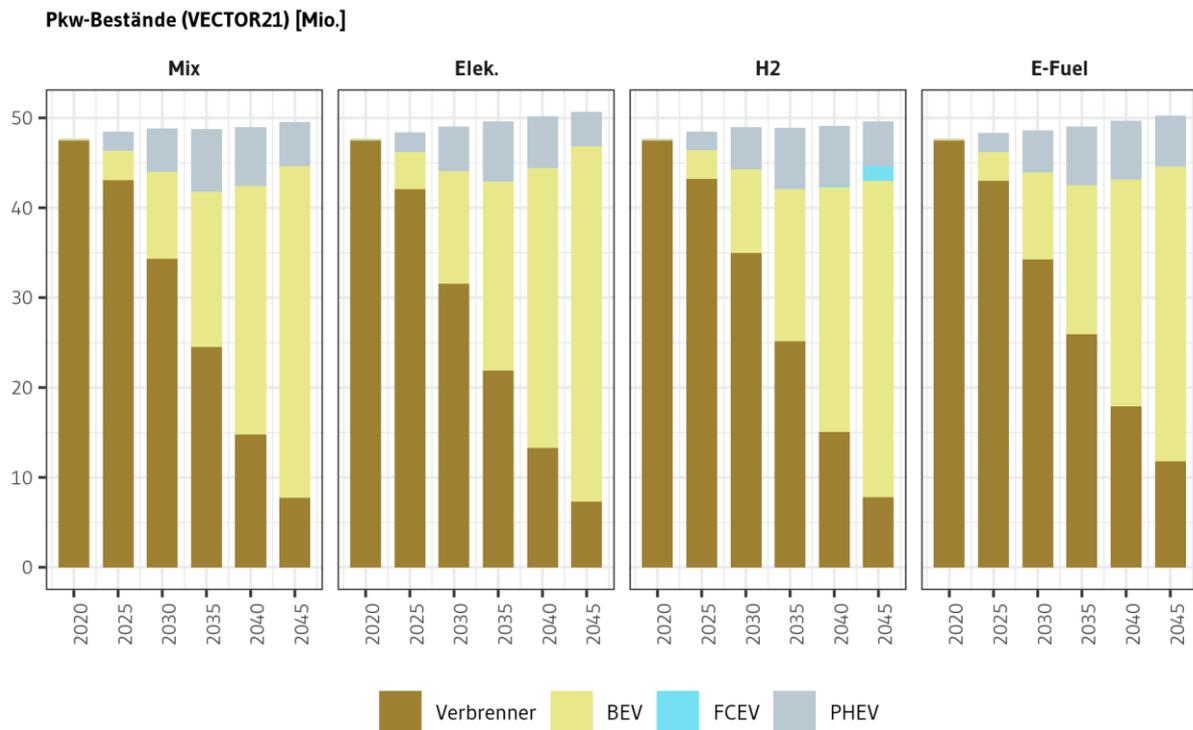


Abbildung 2.2: Pkw-Bestandsentwicklungen (VECTOR21) in den Technologiepfaden bis 2045.

In den Pkw-Beständen aller Technologiepfade dominieren im Jahr 2045 batterieelektrische Fahrzeuge mit einem Anteil von mindestens 76,5 %. Im *Elektrifizierungs*-Szenario findet im Vergleich zu den anderen Szenarien der größte kurzfristige Zuwachs an elektrisch betriebenen Fahrzeugen (E-Pkw¹⁰, das heißt BEVs, PHEVs und FCEVs, vgl. Elektromobilitätsgesetz (2015)) statt. Sie machen im Jahr 2025 einen Anteil von 62 % der Pkw-Neuzulassungen aus, davon mit einer Zahl von 1,6 Mio. und einem alleinigen Anteil von 45 % sogar mehr BEVs als reine Verbrenner (1,3 Mio.). Im Jahr 2030 steigt der Anteil an E-Pkw-Neuzulassungen auf 75 %. Somit befinden sich

¹⁰ E-Pkw, das heißt batterieelektrische Fahrzeuge (battery electric vehicles, BEVs), Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge (Plug-In Hybrid Vehicles, PHEVs) und Wasserstoffbrennstoffzellen-Fahrzeuge (Fuel Cell Electric Vehicles, FCEVs).

2030 bereits 17,5 Mio E-Pkw (36 %) im Pkw-Bestand, davon 12 Mio. BEVs (siehe Abbildung 2.2 „Elek.“). FCEVs spielen bis 2045 eine untergeordnete Rolle im Pkw-Sektor. Selbst im Wasserstoff-Szenario erreichen sie lediglich einen Neuzulassungsanteil von 11,4 % und werden damit in deutlich geringerem Umfang genutzt als BEVs. Im Vergleich zum *Elektrifizierungs*-Szenario führt der Eintritt von FCEV in den Bestand eher zu niedrigeren BEV-Beständen als zu einer zusätzlichen Verdrängung verbleibender Verbrennerfahrzeuge aus der Flotte. Im Vergleich zum *Elektrifizierungs*-Szenario führt der erhöhte FCEV-Bestand eher zu niedrigeren BEV-Beständen als zu einer zusätzlichen Verdrängung verbleibender Verbrennerfahrzeuge aus der Flotte (siehe Abbildung 2.2 „H2“). Während der PHEV-Bestandsanteil in allen Technologiepfaden zunächst bis etwa 2035 auf bis zu 14 % steigt und dann wieder absinkt, reduziert sich der Bestand an reinen Verbrennerfahrzeugen kontinuierlich. In allen Pfaden verbleiben aber auch 2045 noch Verbrenner im Bestand, mit einem Anteil von 24 % die meisten im *E-Fuels*-Szenario.

Im Vergleich zu den DLR-Simulationen kommen die Gesamtsystemmodelle zu leicht abweichenden Ergebnissen bezüglich des Pkw-Bestands (siehe Abbildung 2.3). Das Modell REMod nimmt im *Wasserstoff*- und *E-Fuels*-Szenario einen maximalen Anteil von 80 % batterieelektrischen Fahrzeugen an, um die Präferenz von Nutzern für nicht-batterieelektrische Antriebe abzubilden. Für die übrigen 20 % in diesem Segment ist Wasserstoff der von der Systemoptimierung gewählte Antrieb. Aufgrund der angenommenen Kosten und den unterstellten Verlusten bei der Bereitstellung von Wasserstoff sieht TIMES im Pkw-Segment die direkte Elektrifizierung in jedem Szenario als die kostenoptimale Lösung an.



Abbildung 2.3: Pkw-Bestandsentwicklungen (Gesamtsystemmodelle) bis 2045.

Abbildung 2.4 zeigt noch einmal die Bestandsanteile von E-Pkw für alle Technologiepfade. In der VECTOR21-Modellierung übersteigen sie mit mindestens 14 Mio. im Jahr 2030 den oberen Zielwert des noch aktuellen Klimaschutzprogramms 2030 (KSP; vgl Bundesregierung, 2019a) von 7-10 Mio. E- Pkw um mindestens 40 %. Somit wird auch der jüngst von der Nationalen Plattform Zukunft der Mobilität Arbeitsgruppe 1 „Klimaschutz im Verkehr“ (NPM AG1) bezifferte ambitioniertere Wert von für 2030 anzustrebenden 14 Mio. E-Pkw in jedem Technologiepfad erreicht (vgl. NPM AG1, 2021). Unter Berücksichtigung der Klimaziele auf der einen und angenommenen *maximalen* Wachstumsraten auf der anderen Seite, ergibt sich ab 2030 ein relativ noch stärkeres Wachstum der Elektroautos bei REMod und TIMES.

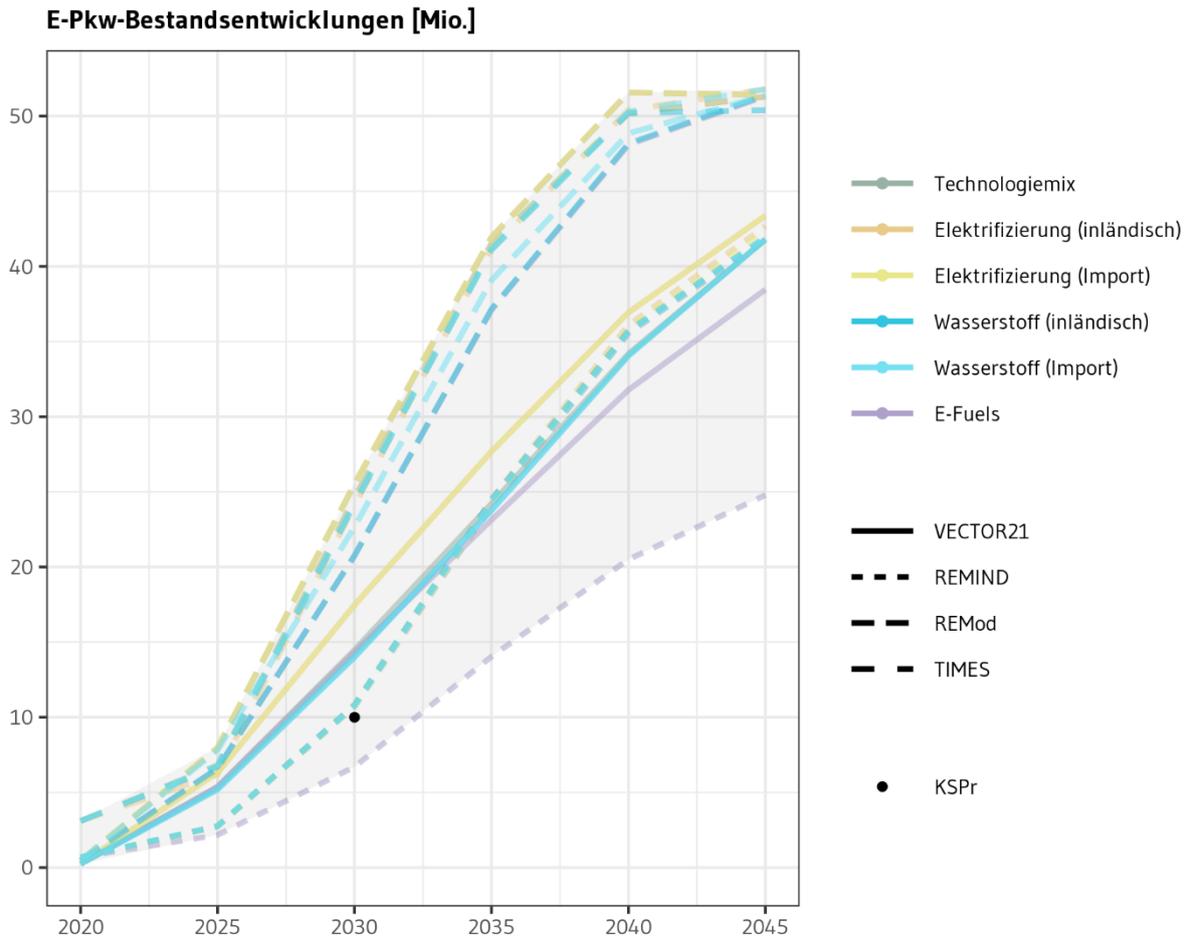


Abbildung 2.4: Prognostizierte E-Pkw-Bestandentwicklung in den verschiedenen Technologiepfaden und Modellen bis 2045. Der schwarze Punkt markiert den oberen Zielwert aus dem Klimaschutzprogramm 2030 (Bundesregierung, 2019a) für elektrisch betriebene Fahrzeuge im Pkw-Bestand im Jahr 2030.

Lkw-Segment

Bis zum Jahr 2045 steigt die Anzahl an eingesetzten Lkw deutlich (siehe Abbildung 2.5), da die Güterverkehrsleistung zunimmt. VECTOR21 zeigt gegenüber dem Personenverkehr über alle Modelle und Technologiepfade hinweg – mit Ausnahme des *Elektrifizierungs*-Szenarios – eine deutlich prominentere Rolle der indirekten Elektrifizierung (Wasserstoff und E-Fuels): Die Diffusion von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen erfolgt generell schneller als im Pkw-Segment. Dies ist, neben den vergleichweisen Kostenvorteilen, auch der kürzeren Lebensdauer der Lkw mit hoher täglicher Fahrleistung geschuldet. Eine direkte Elektrifizierung betrifft vor allem kleinere

bzw. leichtere Lkw (bis inkl. 7,5 t), die insgesamt einen Anteil von ungefähr 78 % der Lkw-Flotte ausmachen und für etwa ein Viertel der Lkw-Emissionen verantwortlich sind.

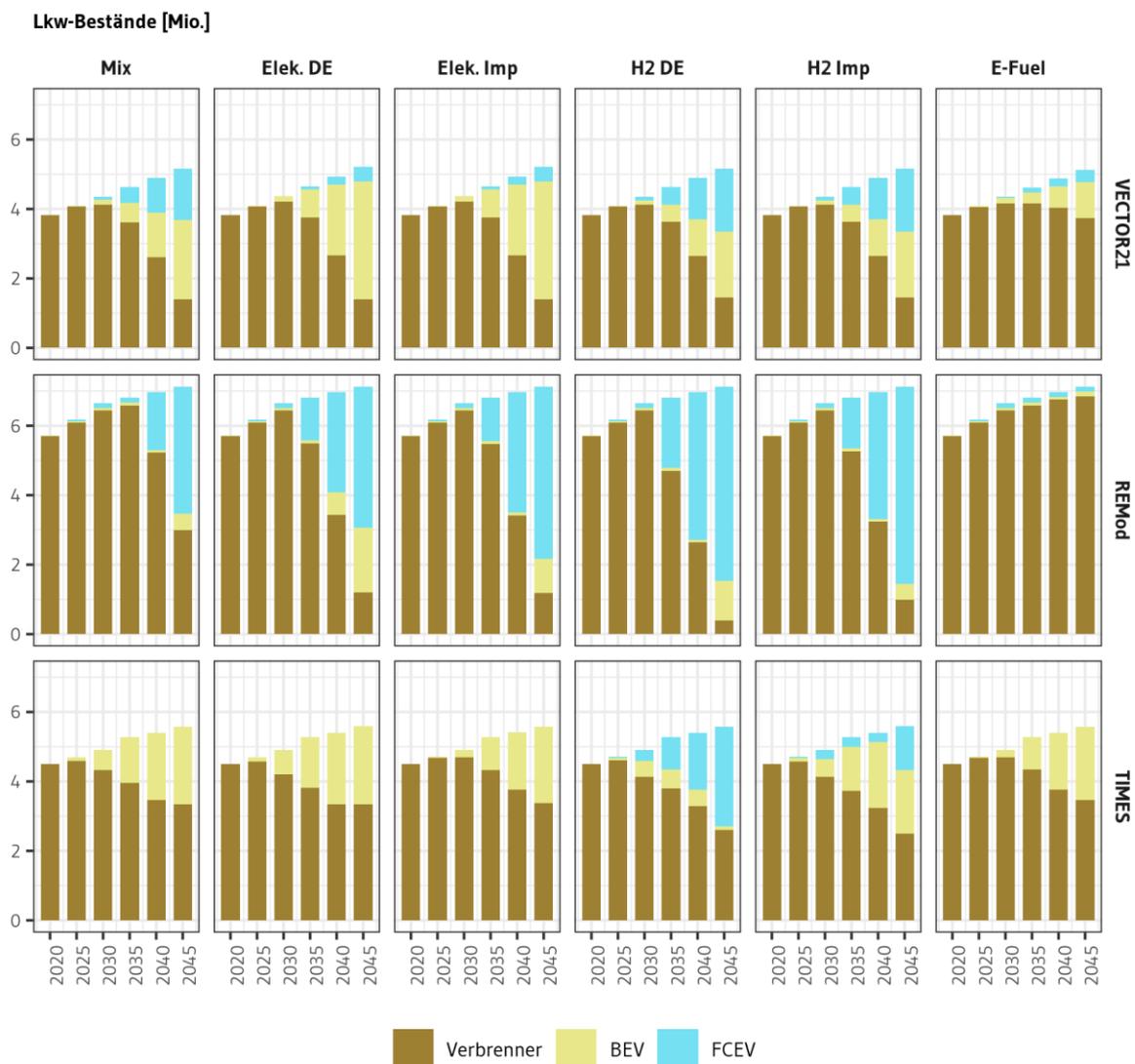


Abbildung 2.5: Lkw-Bestandsentwicklungen für die Technologiepfade bis 2045.

In TIMES wird in allen Technologiepfaden – mit Ausnahme des *Wasserstoff*-Szenarios – kein Potenzial von Wasserstoff für Lkw ermittelt, dafür ein deutlich höheres Potenzial für E-Fuels in Kombination mit der Direktelektrifizierung von Lkw durch Oberleitungen oder als Reichweitenverlängerer. REMod identifiziert im Lkw -Segment für Wasserstoff ein großes Potenzial, das von der Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff aus heimischer Produktion oder Import abhängt. Für alle Modelle gilt, dass im Vergleich zum *Elektrifizierungs*-Szenario ein höherer FCEV-Bestand auch hier eher zu niedrigeren BEV-Beständen als zu einer zusätzlichen Verdrängung verbleibender Verbrennerfahrzeugen aus der Flotte führt. In allen Technologiepfaden befinden sich auch 2045

Verbrenner im Bestand, die meisten im *E-Fuels*-Szenario. Im Gegensatz zu den anderen Technologiepfaden sinkt im E-Fuels-Szenario der Bestand an reinen Verbrennern nicht ab dem Jahr 2030. REMod prognostiziert in diesem Szenario sogar einen kontinuierlichen Anstieg des Verbrenner-Bestands bis 2045.

2.4.3 Endenergienachfrage

Die prognostizierte Endenergienachfrage für den Verkehrssektor sinkt bis zum Jahr 2045 über alle Szenarien und Modelle hinweg (siehe Abbildung 2.6). Dies lässt sich insbesondere durch die höheren Wirkungsgrade der elektrischen Antriebe im Vergleich zu den Verbrennern erklären, weshalb die Umstellung von fossilen Kraftstoffen für diese Antriebe einen Effizienzgewinn bedeutet.

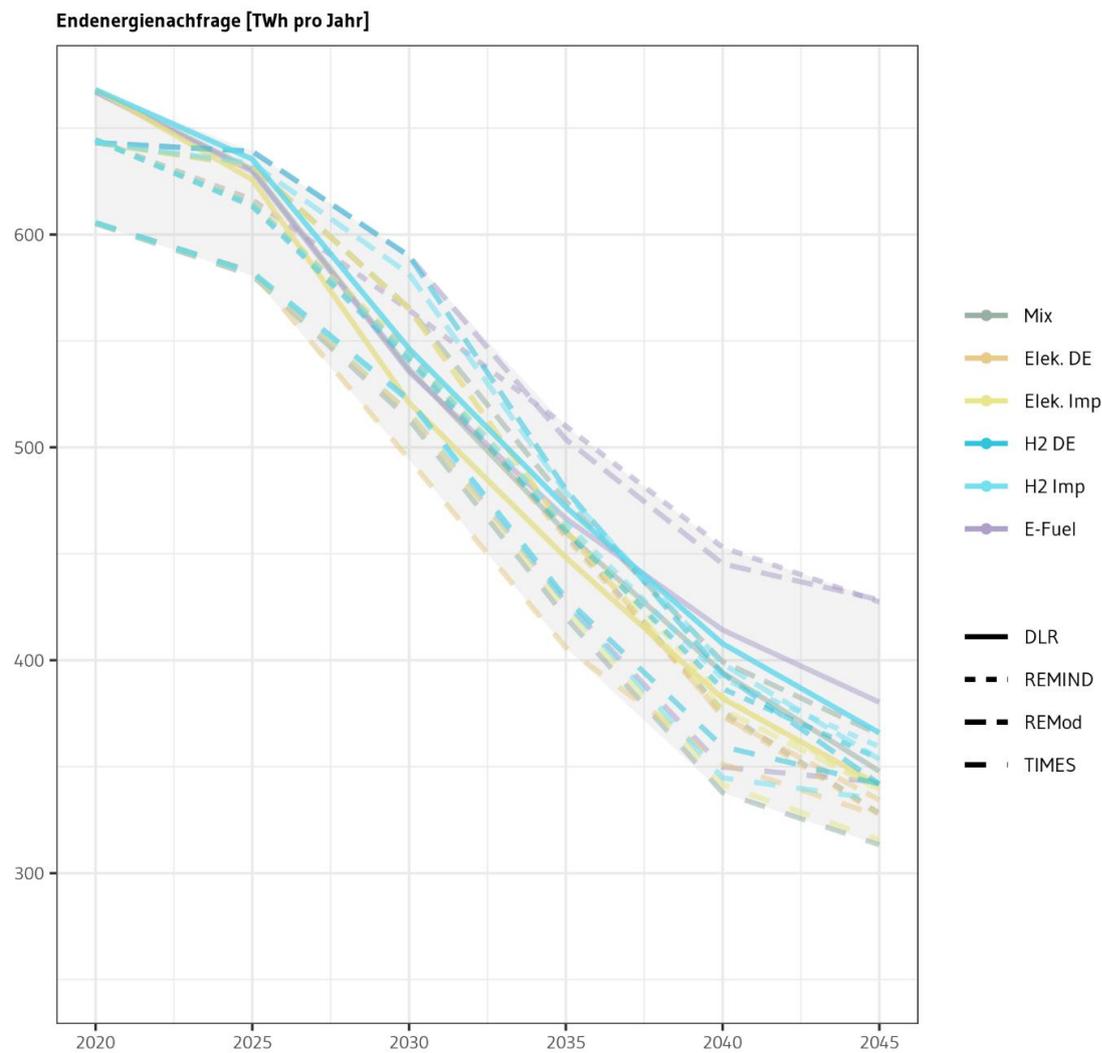


Abbildung 2.6: Endenergienachfrage-Entwicklung für den Sektor in den Technologiepfaden bis 2045.

Die Endenergienachfrage sinkt in der DLR-Modellierung über die Technologiepfade hinweg von 667 TWh um im Mittel 46 % auf 359 TWh. Sie ist im Jahr 2045 im *Elektrifizierungs*-Szenario am geringsten (341 TWh), im *E-Fuels*-Szenario am höchsten (380 TWh). Im *Elektrifizierungs*-Szenario macht Elektrizität mit 65 % und etwa 223 TWh den größten Anteil aus. Dort verbleiben im Jahr 2045 die wenigsten Verbrauchsanteile bei nötigen E-Fuels (27 %; 93 TWh). Im *Wasserstoff*-Szenario ist die Menge an nachgefragter Energie aus Wasserstoff mit etwa 75 TWh (Anteil von 21 %) vergleichsweise am höchsten. Im *E-Fuels*-Szenario verbleiben im Vergleich mit den anderen Technologiepfaden die meisten Verbrauchsanteile bei E-Fuels (41 %; 158 TWh). Im Vergleich zum Szenario mit dem wenigsten Endenergieverbrauch in 2045 (*Elektrifizierungs*-Szenario) werden im *E-Fuels*-Szenario 39 TWh mehr verbraucht und insgesamt, inclusive der zusätzlich benötigten Energie zur Bereitstellung von H₂ und E-Fuels, 140 TWh mehr Energie benötigt.

Abbildung 2.7 zeigt die Endenergienachfrage aufgeschlüsselt nach den einzelnen Energieträgern. Die Nachfrage verlagert sich in allen Technologiepfaden in großen Teilen zur Direktelektrifizierung. Bei priorisierter Zuweisung von Wasserstoff zum Güterverkehr, wie sie besonders REMod sieht, verlagert sich ein großer Teil ebenfalls zum Wasserstoff.



Abbildung 2.7: Endenergienachfrage für einzelne Energieträger in den Technologiepfaden bis 2045.

Abbildung 2.8 zeigt noch einmal die Endenergienachfrage der einzelnen Verkehrsträger aus der DLR-Modellierung. Auch bei den Verkehrsträgern Bus, Bahn, Flugzeug und Binnenschiff werden die Flotte bzw. Strecken direkt elektrifiziert (vorrangig Linienbusse, Bahn) oder indirekt elektrifiziert über Wasserstoffbrennstoffzellen (vorrangig Fernbusse, Bahn, Binnenschiffahrt) bzw. über die Beimischung von E-Fuels (Flugzeuge).



Abbildung 2.8: Endenergienachfrage für Pkw, LKW, Busse, Schienen-, innerdeutschen Flug- und Binnenschiffsverkehr bis 2045.

Tabelle 2.1 zeigt noch einmal die nachgefragte Energie aus Wasserstoff und E-Fuels für das Pkw- und Lkw-Segment in den einzelnen Technologiepfaden. Für die Bereitstellung von Wasserstoff

wird zusätzlich zu den dargestellten Werten noch einmal die gleiche, für die Bereitstellung von E-Fuels noch einmal die 1,5-fache Menge an Energie benötigt.

		Technologiemix		Elektrifizierung		Wasserstoff		E-Fuels	
		H2	E-Fuel	H2	E-Fuel	H2	E-Fuel	H2	E-Fuel
2030	Pkw	0	5,3	0	4,9	0	5,3	0	26,7
	Lkw	13,3	3,5	0,1	3,7	13,9	3,6	4,8	18,2
2045	Pkw	0	58,2	0	52,1	8,4	59,2	0	91,2 (2040: 129,0)
	Lkw	44,4	25,7	13,5	31,9	59,5	37,1	27,3	54,2 (2040:89,7)

Tabelle 2.1: Endenergienachfrage nach Wasserstoff (H2) und E-Fuels für das Pkw- und Lkw-Segment in den einzelnen Technologiepfaden in den Jahren 2030 und 2045 in TWh.

2.4.4 CO₂-Emissionen

Alle Technologiepfade erreichen im Jahr 2045 eine vollständige Dekarbonisierung des Verkehrssektors bzw. enthalten nur noch sehr geringe Mengen an Restemissionen (<5 Mt; siehe Abbildung 2.9). Die DLR-Modellierung prognostiziert das Erreichen dieses Ziels durch eine Kombination aus der weit vorangeschrittenen Elektrifizierung der Pkw- und Lkw-Flotten und die Bereitstellung von CO₂-neutralen synthetischen Kraftstoffen für die verbleibenden Verbrenner.

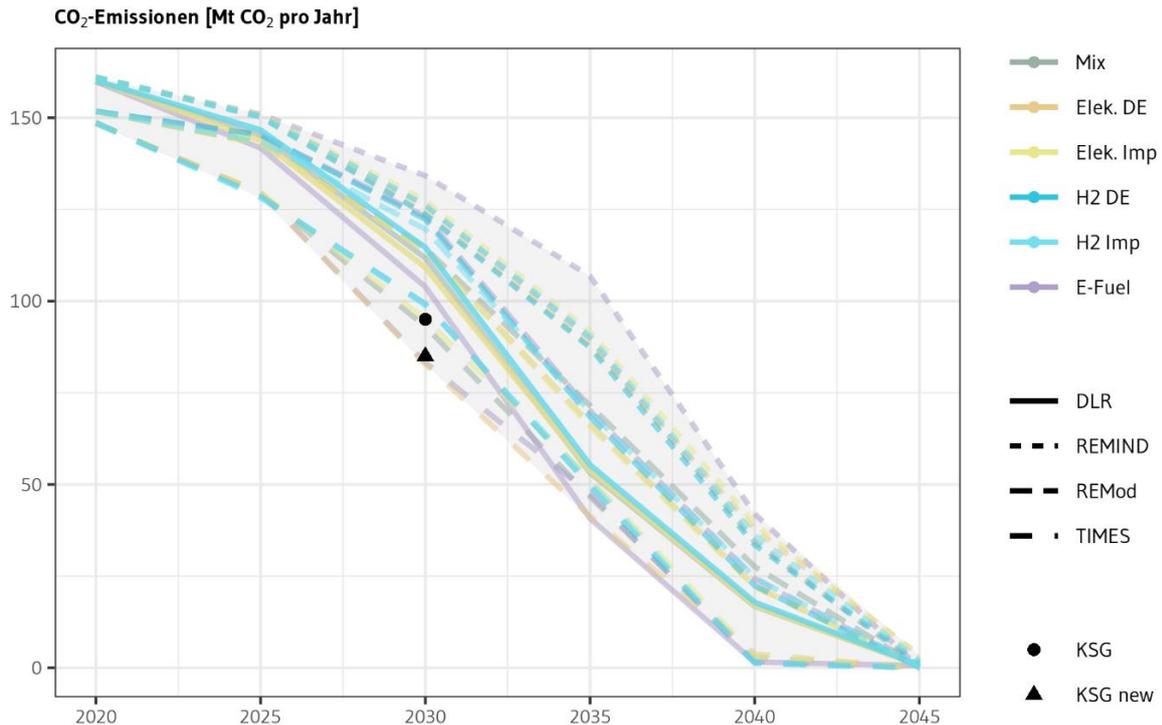


Abbildung 2.9: CO₂-Emissionen in den Technologiepfaden bis 2045 in Mt. Das schwarze Dreieck markiert das sektorale Emissionsziel aus dem aktualisierten KSG (KSG, 2021) für das Jahr 2030. Die dargestellten CO₂-Emissionsentwicklungen sind immer im Zusammenhang mit der im jeweiligen Technologiepfad benötigten Energie zu bewerten (siehe Abschnitt 2.4.3 und Abbildung 2.6), beispielsweise haben die *E-Fuels*-Szenarien über die Modelle hinweg den größten Energiebedarf.

Das Sektor-Ziel aus dem Bundes-Klimaschutzgesetz für das Jahr 2030 wird mit den hinterlegten Annahmen und Maßnahmen in der DLR-Modellierung jedoch in *keinem* der Technologiepfade erreicht. Im *Technologiemix*-Szenario werden 27 Mt mehr CO₂ als vorgesehen (85 Mt) emittiert, im *Elektrifizierungs*-Szenario 24 Mt, im *Wasserstoff*-Szenario 30 Mt, im *E-Fuels*-Szenario 19 Mt aufgrund der schnellen Beimischung von E-Fuels mit einer Beimischungsquote von 10 % in Kombination mit einer starken Umstellung auf E-PKW (siehe Abbildung 2.4). Die durchschnittliche Ziel-Verfehlungsquote über alle Pfade für die Jahre 2025 und 2030 beläuft sich auf 23 Mt. Auch die Optimierungen der Gesamtsystemmodelle REMIND und TIMES sowie das Modell REMod ermitteln kurzfristig mehr Emissionen in den anderen Sektoren einzusparen, weshalb keine steileren Minderungskurven prognostiziert werden. Zwei Ausnahmen bilden das *Elektrifizierung (inländisch)*- und das *E-Fuels*-Szenario der TIMES-Berechnung. In Kombination mit der starken Umstellung des Pkw-Segments auf E-Pkw (51 % bzw. 24 Mio. im Pkw-Bestand des Jahres 2030) wird im *Elektrifizierung (inländisch)*-Szenario erneuerbarer Strom prioritär im Verkehrssektor genutzt, um den Strombedarf zu decken, was zu niedrigeren Emissionen führt. Im *E-Fuels*-Szenario wird durch

die unterstellte Verfügbarkeit von größeren Import-Mengen bezahlbarer E-Fuels etwas mehr CO₂ eingespart als in den anderen Szenarien.

Abbildung 2.10 zeigt die CO₂-Emissionen noch einmal aufgeschlüsselt nach Verkehrsträgern.

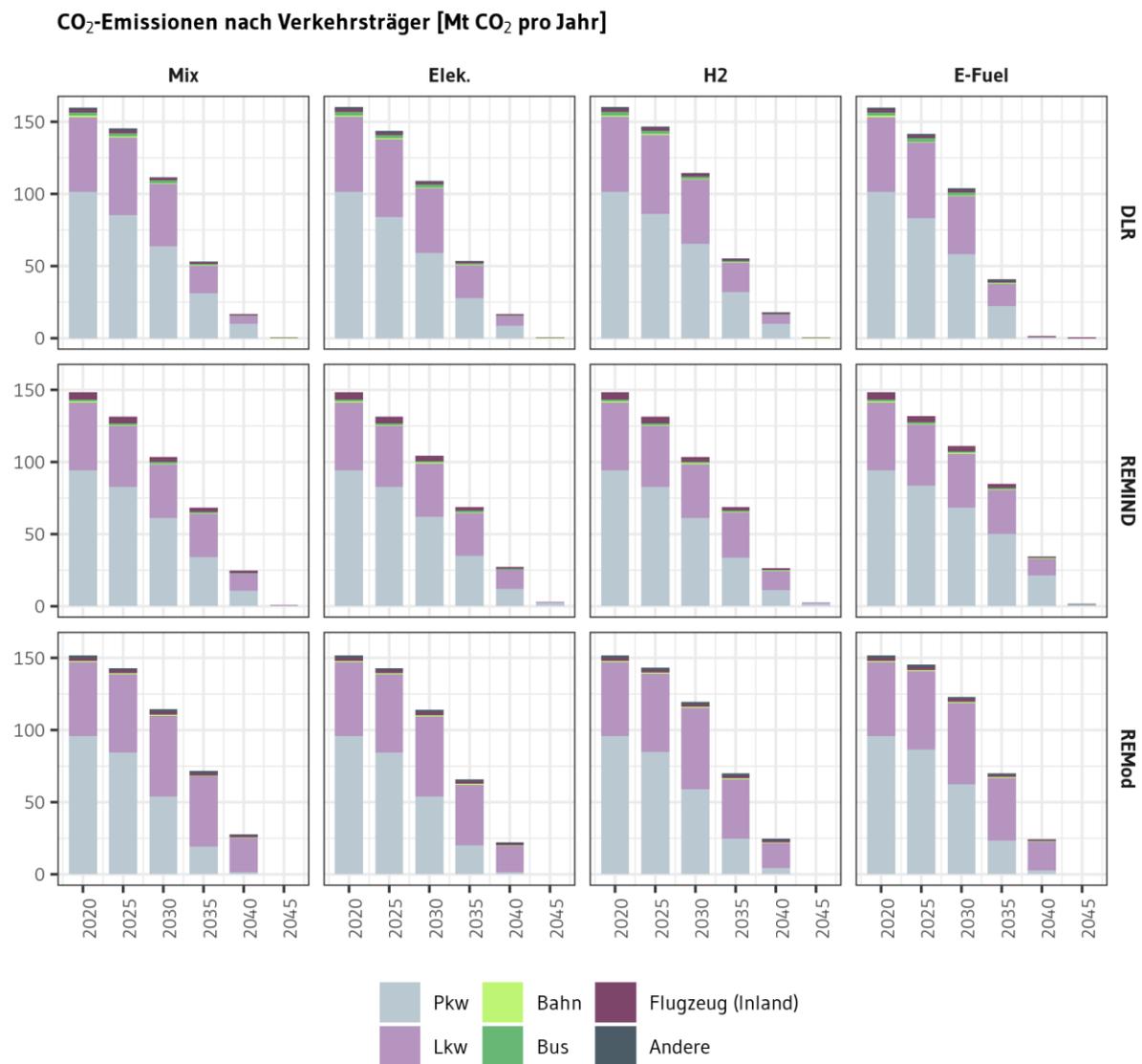


Abbildung 2.10: CO₂-Emissionen durch einzelne Verkehrsträger in den Technologiepfaden bis 2045. Die dargestellten CO₂-Emissionsentwicklungen sind immer im Zusammenhang mit der im jeweiligen Technologiepfad benötigten Energie zu bewerten (siehe Abschnitt 2.4.3).

Box: CO₂-Emissionen mit internationalem Bezug

Die oben dargestellten Ergebnisse behandeln innerdeutsche Verkehre unter Ausschluss einiger „deutscher“ Verkehre mit internationalem Bezug, konkret des (interkontinentalen) See- sowie des internationalen Luftverkehrs. Der Grund ist, dass diese Verkehre nicht für die Bilanzierung der THG-Emissionszielerreichung in Deutschland herangezogen werden.

Die Verkehrsleistungen dieser Segmente beliefen sich im Jahr 2019 auf etwa 2 Bio. weitere Tonnenkilometer zwischen deutschen sowie von und nach ausländischen Seehäfen sowie etwa 62 Mrd. weitere Personenkilometer durch Linien- und Pauschalflugreisen innerhalb der EU bzw. etwa insgesamt 250 Mrd. weitere Personenkilometer durch den internationalen Personenluftverkehr und etwa 13 Mrd. weitere Tonnenkilometer durch den internationalen Güterluftverkehr (vgl. BMU, 2019; BMVI, 2021). Der Endenergiebedarf lässt sich für das Jahr 2019 auf 31 TWh für die Seeschifffahrt und auf etwa 107 TWh für den internationalen Luftverkehr beziffern (vgl. BMU, 2019).

Bis zum Jahr 2050 sollen sich der Gesamt-Endenergiebedarf der Seeschifffahrt im Vergleich zu 2020 um 30 % erhöhen und der des internationalen Luftverkehrs noch einmal verdoppeln bis vervierfachen, die direkten CO₂-Emissionen beider Verkehre im Vergleich zu 2008 bzw. 2005 aber halbieren (Bobst et al., 2019; IMO, 2020; IPOL, 2020). Für beide Verkehre ist es sinnvoll, die Endenergienachfrage in Richtung indirekte Elektrifizierung zu verlagern, um CO₂-Emissionen zu senken. Neben Effizienzgewinnen von mindestens 15 % bis zu 30 % sollen CO₂-Emissionsminderungen im Luftverkehr z. B. durch eine E-Fuels-Beimischung von mindestens 40 % bis zu 80 % erreicht werden (Leipold and et al., 2021). Beides zusammen genügt in der Prognose lediglich, die jetzigen CO₂-Emissionen dieses Segments konstant zu halten. Für die Seeschifffahrt sollen neben Effizienzgewinnen, die Nutzung von E-Fuels, Methanol oder Ethan zur CO₂-Emissionsminderung beitragen (Bundestag, 2018).

2.4.5 Potenziale und Grenzen der direkten Elektrifizierung

Für alle Verkehrsträger (mit Ausnahme von Flugzeugen), insbesondere für Pkw, leichte LKW, Linienbusse und die Bahn ergeben sich Emissionsminderungspotenziale in den nächsten beiden Dekaden vor allem durch eine zunehmende direkte Elektrifizierung.

Das *Elektrifizierungs*-Szenario beschreibt das maximale Potenzial einer Priorisierung dieser Strategie basierend auf zusätzlichen spezifisch förderlichen Entwicklungen (starke Kostendegression,

besonders schneller Ladeinfrastrukturausbau). Es lässt sich aber konstatieren, dass in den Modellen selbst die Transformationsdynamik in diesem Technologiepfad *nicht* ausreicht, um mittels einer reinen Antriebswende in den verbleibenden neun Jahren bis 2030 das 2030 KSG-Ziel von 85 Mt THG-Emissionen zu erreichen – trotz Übererfüllung der Bestandsziele für elektrisch betriebene Fahrzeuge aus dem Klimaschutzprogramm 2030 (Bundesregierung, 2019a) bzw. dem Übertreffen der Zielwerte der NPM AG1 (NPM AG1, 2021). Ein noch höheres Potenzial für Emissionsminderungen bis 2030 und ein noch schnellerer Austausch der Fahrzeugflotten wird begrenzt unter anderem durch die lange Nutzungsdauer von Pkw und Nachfragemuster (Kauf- und Mobilitätsverhalten). Das Kaufverhalten ist z. B. stark beeinflusst von Infrastrukturhemmnissen, im Falle der Direktelektrifizierung vom Zugang zu Ladeinfrastruktur (siehe Box: Ladeinfrastruktur).

Box: Ladeinfrastruktur

Ein nicht ausreichender Zugang zu Ladeinfrastruktur stellt ein wesentliches Hemmnis bei der Anschaffung eines E-Fahrzeugs dar (BDEW, 2019; Wicki et al., 2021). Neben dem privaten Zugang – zwei von drei Ladevorgängen werden zurzeit am privaten Stellplatz durchgeführt (BDEW, 2019) – ist der Zugang zu öffentlicher Ladeinfrastruktur von entscheidender Bedeutung. Je nach Ladeinfrastrukturkonzept (Ausbau von Schnellladepunkten als „Tankstellenladeinfrastruktur“ versus Ausbau von verteilten gewöhnlichen Ladepunkten als „Parkplatzladeinfrastruktur“) variiert die Anzahl an Ladepunkten, die es bedarf, um einen nicht-hemmenden Zugang zu öffentlicher Ladeinfrastruktur zu gewährleisten. Für das Elektrifizierungs-Szenario mit prognostizierten 17,5 Mio. BEVs und PHEVs im Bestand des Jahres 2030 wären das z. B. zwischen 300.000 und 1,6 Mio. Ladepunkte. Davon müssten entsprechend 60.000 bis 260.000 Schnellladepunkte sein (vgl. EU, 2014; EU Kommission, 2021a; Nicholas and Wappelhorst, 2020; NPM AG5, 2020; Windt and Arnhold, 2020). Der im Jahr 2019 verabschiedete Masterplan Ladeinfrastruktur hat das Ziel 1 Mio. öffentlich zugängliche Ladepunkte bis 2030 zu schaffen (Bundesregierung, 2019b), 10.000 davon sollen kurzfristig als Schnellladepunkte entstehen. Das Schnellladegesetz (SchnellLG, 2021) sieht dafür den Ausbau von 1.000 Lade-Hubs bis zum Ende des Jahres 2023 vor.

2.4.6 Einsatzbereiche für Wasserstoff

Ein Potenzial für Emissionsminderungen durch den Einsatz von Wasserstoff-Brennstoffzellen besteht für alle Verkehrsträger. Für Pkw ist das Potenzial bis 2030 durch den späten Markteintritt von FCEVs im Vergleich zu bereits heute verfügbaren BEVs und deren Kostenvorteil und Effizienz sehr gering und auch bis 2045 begrenzt. Ein deutlicher Markthochlauf von FCEVs ist im Pkw -Segment nur im Wasserstoff-Szenario aufgrund der Annahmen zur FCEV-Kostendegression und Verfügbarkeit der H₂-Tankstelleninfrastruktur zu verzeichnen. Für Busse ergibt sich ein kurzfristiges Emissionseinsparungspotenzial aus der Nutzung von Wasserstoffbrennstoffzellen vor allem für Fernbusse. Das Potenzial im straßengebundenen Güterverkehr liegt kurzfristig vor allem bei großen bzw. schweren Lkw. Begrenzt ist das Potenzial dort hauptsächlich von der Betriebskostenentwicklung. Je nachdem, wie günstig Wasserstoff im Vergleich zu anderen Energieträgern werden kann, fällt die Entscheidung für den entsprechenden Energieträger, wobei auch hier die Länge der Einzelwege und somit zusätzliches Gewicht durch Energieträgermitnahme (Batterie versus Brennstoffzelle und Tank) eine entscheidende Rolle spielt. Des Weiteren bietet sich Potenzial beim Binnenschiffsverkehr. Unter der Voraussetzung einer ausreichenden Verfügbarkeit im Verkehrssektor und von marktfähigen Preisen (*Wasserstoff-Szenario*) erreicht die direkte Nachfrage nach Wasserstoff ihr Maximum im betrachteten Zeitraum bei ca. 75 TWh im Jahr 2045. Im Technologiemix des *Technologiemix*-Szenarios werden im Jahr 2045 50 TWh verbraucht (2030: ca. 15 TWh).

2.4.7 Einsatzbereiche für E-Fuels

In allen Technologiepfaden werden synthetische Kraftstoffe benötigt, um verbleibende Verbrennungsmaschinen CO₂-neutral zu betanken. Bereits heute gibt es entsprechend verpflichtende Regulierungen zum Einsatz von E-Fuels, wie beispielsweise für die Luftfahrt. Die Beimischung von E-Fuels könnte kurzfristig beginnen, um die Wahrscheinlichkeit zu erhöhen, frühzeitig die THG-Ziele zu erreichen. Befördert werden könnte das z. B. durch eine Anrechenbarkeit von E-Fuels auf die CO₂-Flottenziele im Rahmen eines Zertifikatssystems zwischen Produzenten von E-Fuels und Erstausrüstern (Original Equipment Manufacturer, OEM). Die frühzeitige Bereitstellung von E-Fuels verringert jedoch langfristig das Potenzial der Direktelektrifizierung und sie schiebt Lasten zur Erzeugung bzw. zum Import regenerativ erzeugten Wasserstoffs auf den Stromerzeugungssektor. Eine Alternative könnte ein verzögerter Beimischungspfad, das heißt ein späterer Beginn sein. Hierbei ist dann ein schnellerer Hochlauf der Beimischungsquote notwendig.

Für die Erreichung von CO₂-Neutralität des Verkehrssektors durch eine priorisierte schnelle und hohe Beimischung von E-Fuels (*E-Fuels*-Szenario) würde im Vergleich zu den anderen Szenarien kurz- und langfristig ein deutlich größerer Bedarf an Erneuerbarem Strom entstehen (siehe Tabelle 2.1 für Beispielwerte für den Pkw- und Lkw-Sektor). Das bedeutete einen im Vergleich zu den anderen Technologiepfaden noch wesentlich schnelleren und größeren Zubau an Erneuerbaren Energien und einen schnellen und hohen Zuwachs an Herstellung oder Import von grünem Wasserstoff oder hohe Importmengen bereits produzierter E-Fuels. Die Mengen an nötigen CO₂-Entnahmen sind in Kapitel 8 dargestellt.

2.5 Prioritäten für den Zeithorizont 2030

Für kurzfristige Minderungen direkter CO₂-Emissionen im Verkehrssektor muss ein nennenswerter Anteil der Verkehrsleistung mit fossilen Verbrennungskraftstoffen durch Alternativen ersetzt werden.

Für die Antriebswende im Zeitraum bis 2030 stellt die direkte Elektrifizierung der Flotten dafür die priorisierte Lösung dar. Wasserstoff und E-Fuels stehen erst später in ausreichender Größenordnung zur Verfügung und können somit kurzfristig weniger zur CO₂-Emissioneminderung beitragen. Bis zum Jahr 2030 ist es demzufolge notwendig, dass forciert batterieelektrische Fahrzeuge in den Fahrzeugbestand kommen. Hinterlegte Maßnahmen wie die Verschärfung der Flottengrenzwerte bis 2030 auf bis zu -50 % gegenüber 2021, eine Verteuerung der mit fossilen Kraftstoffen gefahrenen Kilometer durch einen schnell steigenden CO₂-Preis (2025 bereits 100 Euro/tCO₂, Anstieg auf 500 Euro/t bis 2045) sowie ein beschleunigter Ausbau der Ladeinfrastruktur zeigen in der DLR-Modellierung einen substantiell dynamischeren Austausch der Flotten im Vergleich zu anderen Projektionen (vgl. NPM AG1, 2021). Jedoch werden selbst durch diese Dynamik die Zielwerte des Reduktionpfades aus dem Bundes-Klimaschutzgesetz bis 2030 (KSG, 2021) *nicht* erreicht.

Um die Dynamik der Antriebswende weiter zu steigern, kommen zusätzliche Kaufanreize für E-Fahrzeuge, vor allem Null-Emissionsfahrzeuge (BEVs und FCEVs), in Betracht. Die aktuellen Kaufprämien (Umweltbonus plus Innovationsprämie) haben sich positiv auf die Neuzulassungen ausgewirkt. Sie dienen dazu, den Preisunterschied (z. B. aufgrund noch nicht in entsprechender Höhe erfolgter Kostendegression) zu Verbrennerfahrzeugen auszugleichen. Jedoch sind Elektrofahrzeuge nach wie vor nicht günstiger. Die Wirksamkeit einer weiteren Erhöhung dieser Kaufprämien könnte aufgrund des zurzeit knappen Angebots eingeschränkt sein. Alternativ zu

den bisherigen Kaufprämien könnte für Neuzulassungen von Pkw und Lkw ein Bonus-Malus-System eingeführt werden, bei dem die Erlöse aus einer Abgabe auf Verbrenner dazu genutzt werden, eine Prämie für Käufe von Null-Emissionsfahrzeugen zu finanzieren. Ebenfalls werden eine weitere Verschärfung der CO₂-Standards auf bis zu -55 % bis 2030 gegenüber 2021 bis hin zu einem faktischen Verbrenner-Neuzulassungsverbot diskutiert (EU Kommission, 2021b). Gleichzeitig kann eine zusätzliche Verteuerung der Nutzung von Verbrennern durch einen forcierten Anstieg des CO₂-Preises den Umstiegsprozess zu E-Fahrzeugen beschleunigen. Eine Nutzung des CO₂-Preises als Leitinstrument im Verkehrssektor würde im Vergleich zum angenommenen Preisfad nochmal höhere Preise erfordern. Der aktuell gesetzlich festgelegte CO₂-Preisfad bis 2025, sowie der hier angenommene, führt zu solchen Mehrkosten für Benzin und Diesel, die wenig zur Antriebswende beitragen.

Weitere Alternativen und damit auch Möglichkeiten für voraussichtlich notwendig werdende Sofortmaßnahmen zur Erreichung der Sektorziele bis 2030 bilden Maßnahmen, die zu einer Änderung des Mobilitätsverhaltens (Mobilitätswende) beitragen. Dafür kommen attraktivitätssteigernde Maßnahmen für den Fuß- und Radverkehr (z. B. Neuaufteilung des Verkehrsraums) und den öffentlichen Personenverkehr (z. B. Kostensenkung, Angebotsverbesserung, Taktverdichtung), sowie weitere attraktivitätsmindernde Maßnahmen für den motorisierten Individualverkehr (z. B. Verteuerung durch eine City-Maut, Entschleunigung) in Frage, um eine Verlagerung des derzeit noch überwiegend mit fossilen Kraftstoffen getätigten Individualverkehrs zu erreichen. Auch Maßnahmen, die Verkehrsträger nicht direkt adressieren, wie zum Beispiel allgemeine Regelungen zum Homeoffice, bieten ein Mittel.

Das Ariadne-Arbeitspaket AP7 „Sektorale Fokusanalyse Verkehrswende“ erarbeitet das Potenzial und die Bewertung dieser und weiterer Maßnahmen. Im besonderen Fokus steht dabei deren Akzeptanz durch die Bürgerinnen und Bürger.

2.6 Besonders wichtige Instrumente für die Erreichung des 2045-Ziels

Es wird klar, dass für die Erreichung des Ziels von null THG-Emissionen im Jahr 2045 mithilfe der Antriebswende bereits jetzt Maßnahmen ergriffen werden müssen, die über geplante und teilweise sogar über noch diskutierte Maßnahmen hinausgehen. Die folgenden Instrumente sind für eine Antriebswende notwendige bzw. so genannte No-Regret-Instrumente, weil effektiv und nachhaltig im Sinne von technologieunabhängig förderlich:

Ein schneller und massiver Ausbau der Erneuerbaren Energien ist unabhängig vom Technologiepfad notwendig, um die nachgefragte Energie tatsächlich auch indirekt CO₂-neutral zur Verfügung zu stellen. Ein sehr schneller Ausbau von Lade- bzw. Tankinfrastruktur beseitigt Hemmnisse, sich doch für den Kauf eines E-Pkws anstatt eines Verbrenners zu entscheiden. Die Neuzulassungen von E-Pkw im Zeitraum nach 2030 profitieren besonders von dem bereits vorhandenen Zugang zu Lade- bzw. Tankinfrastruktur. Strengere CO₂-Standards für Neufahrzeuge nehmen weiterhin die Hersteller in die Pflicht und garantieren eine Angebotsweiterung an E-Pkw. Ein starkes CO₂-Preis-Signal erhöht signifikant die Kosten nicht emissionsfrei zurückgelegter Kilometer. Eine relative Attraktivitätssteigerung von E-Pkw-Käufen und die Attraktivitätsminderung von Verbrenner-Käufen führen kurzfristig zu einem steileren Anstieg an E-Pkw-Käufen und können so durch sozial-normative Effekte auch den langfristigen Trend zur vollständigen Antriebswende unterstützen.

2.7 Fazit

Das Ziel von null THG-Emissionen im Verkehrssektor im Jahr 2045 kann mit den hinterlegten Annahmen erreicht werden. Voraussetzungen für die hier dargestellte Antriebswende bilden ausreichend vorhandener grüner Strom, technologische Entwicklungen, die zu einer deutlichen Kostendegression von alternativen Antrieben führen, ein deutlich verbesserter Zugang zu Lade- bzw. Tankinfrastruktur sowie scharfe CO₂-Standards und ein starkes CO₂-Preis-Signal. Dadurch wären womöglich im Jahr 2045 im Vergleich zu heute keine drastischen Veränderungen in der Verkehrsnachfrage (gefährdete Personen- bzw. Tonnenkilometer und modale Verlagerungen) notwendig.

Jedoch, die Erreichung der Ziele aus dem Bundes-Klimaschutzgesetz bis 2030 wird nicht gewährleistet. Die Transformation durch eine reine Antriebswende ist eher träge. Es bedarf zusätzlicher Maßnahmen, die eine Änderung des Mobilitätsverhaltens fördern. Industriepolitische Maßnahmen zur Förderung der Antriebswende schaffen zwar Rahmenbedingungen, die tatsächlichen Auswirkungen auf z. B. daraus resultierende Emissionsminderungen sind über Verhalten von Verbraucherinnen und Verbrauchern vermittelt. Deshalb stellt deren Akzeptanz von weiterhin notwendigen Maßnahmen eine der größten Herausforderungen dar.

Literaturangaben

- BDEW, 2019. Meinungsbild E-Mobilität - Meinungsbild der Bevölkerung zur Elektromobilität. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://www.bdew.de/media/documents/Awh_20190527_Fakten-und-Argumente-Meinungsbild-E-Mobilitaet.pdf.
- BMU, 2019. Projektionsbericht 2019 für Deutschland gemäß Verordnung (EU) Nr.525/2013. Bundesumweltministerium [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://cdr.eionet.europa.eu/de/eu/mmr/art04-13-14_lcds_pams_projections/projections/envxnw7wq/Projektionsbericht-der-Bundesregierung-2019.pdf.
- BMVBW, 2000. Verkehr in Zahlen. Deutscher Verkehrsverlag GmbH, Hamburg [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen_2000-pdf.pdf?__blob=publicationFile.
- BMVI, 2021. Verkehr in Zahlen 2020/2021. 49. Jahrgang. Herausgegeben durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Korrekturversion vom 13.04.2021. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen-2020-xls.xlsx?__blob=publicationFile.
- Bobst J, Hölzer-Schopohl O, Lindmaier J, Myck T, Schmied M, Weiß J, 2019. Wohin geht die Reise? - Luftverkehr der Zukunft. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/uba_fb_wohin-geht-die-reise.pdf.
- Bundesregierung, 2019a. Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050. Bundesregierung, Berlin [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/974430/1679914/e01d6bd855f09bf05cf7498e06d0a3ff/2019-10-09-klima-massnahmen-data.pdf?download=1>.
- Bundesregierung, 2019b. Masterplan Ladeinfrastruktur der Bundesregierung - Ziele und Maßnahmen für den Ladeinfrastrukturaufbau bis 2030. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/masterplan-ladeinfrastruktur.pdf?__blob=publicationFile.
- Bundestag, 2018. Maßnahmen zur Minderung von Emissionen in der Schifffahrt - Alternative Kraftstoffe und Antriebe. Aktenzeichen: WD 8 - 3000 - 032/18. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://www.bundestag.de/resource/blob/559626/b136948e9897d506d321fb4fca5ca00c/wd-8-032-18-pdf-data.pdf>.
- Elektromobilitätsgesetz, 2015. Elektromobilitätsgesetz. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://www.gesetze-im-internet.de/emog/EmoG.pdf>.
- EU, 2014. RICHTLINIE 2014/94/EU DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 22. Oktober 2014 über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=celex:32014L0094>.
- EU Kommission, 2021a. BERICHT DER KOMMISSION AN DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT UND DEN RAT über die Anwendung der Richtlinie 2014/94/EU über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52021DC0103&from=EN>.
- EU Kommission, 2021b. Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/amendment-regulation-co2-emission-standards-cars-vans-with-annexes_en.pdf.
- Hein F, Litz P, Graichen P, 2021. Abschätzung der Klimabilanz Deutschlands für das Jahr 2021. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://www.agora->

- energiewende.de/veroeffentlichungen/abschaetzung-der-klimabilanz-deutschlands-fuer-das-jahr-2021/.
- IMO, 2020. Fourth Greenhouse Gas Study 2020. IMO International Maritime Organization [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Fourth%20MO%20GHG%20Study%202020%20-%20Full%20report%20and%20annexes.pdf>.
- IPOL, 2020. Greenhouse gas emissions from shipping: waiting for concrete progress at IMO level. IPOL Policy Department for Economic, Scientific and Quality of Life Policies [Aufruf am: 30.09.2021] URL: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2020/652754/IPOL_BRI\(2020\)652754_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2020/652754/IPOL_BRI(2020)652754_EN.pdf).
- KSG, 2021. Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG). [Aufruf am: 30.09.2021] URL: http://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBI&jumpTo=bgbl121s3905.pdf.
- Leipold A, Aptsiauri G, Ayazkhani A, Bauder U, Becker R-G, Berghof R, Claßen A, Dadashi A, Dahmann K, Dzikus N, et al., 2021. DEPA 2050 - Development Pathways for Aviation up to 2050. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://www.dlr.de/fw/Portaldata/42/Resources/dokumente/aktuelles/DEPA2050_StudyReport.pdf.
- Nicholas M, Wappelhorst S, 2020. Regional Charging Infrastructure Requirements in Germany Through 2030. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://theicct.org/publications/regional-charging-infra-germany-oct2020>.
- NPM AG1, 2021. Wege für mehr Klimaschutz im Verkehr. Nationale Plattform Zukunft der Mobilität Arbeitsgruppe 1 „Klimaschutz im Verkehr“ [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2021/07/NPM_AG1_Wege-fuer-mehr-Klimaschutz.pdf.
- NPM AG5, 2020. Bedarfsgerechte und wirtschaftliche öffentliche Ladeinfrastruktur – Plädoyer für ein dynamisches NPM-Modell. Nationale Plattform Zukunft der Mobilität Arbeitsgruppe 5 „Verknüpfung der Verkehrs- und Energienetze, Sektorkopplung“ [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2020/04/NPM-AG-5-Bedarfsgerechte-und-wirtschaftliche-%C3%B6ffentliche-Ladeinfrastruktur.pdf>.
- SchnellIG, 2021. Schnelladegesetz – SchnellIG. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://www.gesetze-im-internet.de/schnellig/SchnellIG.pdf>.
- UBA, 2021a. National Inventory Report for the German Greenhouse Gas Inventory 1990 – 2019. Climate Change 23/2020. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-04-15-climate-change_23-2020_nir_2020_en_0.pdf.
- UBA, 2021c. Emissionen des Verkehrs. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/emissionen-des-verkehrs#Pkw-fahren-heute-klima-und-umweltvertraglicher>.
- UBA, 2021d. Vorjahreschätzung der deutschen Treibhausgas-Emissionen für das Jahr 2020. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/2021_03_10_trendtabellen_thg_nach_sektoren_v1.0.xlsx.
- Wicki M, Brückmann G, Quoss F, Bernauer T, 2021. Hemmnisse und Massnahmen beim Kauf von Elektrofahrzeugen: Schlussbericht zum Themenbereich Haushalte der Energieforschung Stadt Zürich. (ISTP Paper Series, 6) [Aufruf am: 14.09.2021] URL: <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000476614>.
- Windt A, Arnhold O, 2020. Ladeinfrastruktur nach 2025/2030: Szenarien für den Markthochlauf - Studie im Auftrag des BMVI. [Aufruf am: 14.09.2021] URL: https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2020/11/Studie_Ladeinfrastruktur-nach-2025-2.pdf.



Der rote Faden durch die Energiewende: Das Kopernikus-Projekt Ariadne führt durch einen gemeinsamen Lernprozess mit Politik, Wirtschaft und Gesellschaft, um Optionen zur Gestaltung der Energiewende zu erforschen und politischen Entscheidern wichtiges Orientierungswissen auf dem Weg zu einem klimaneutralen Deutschland bereitzustellen.

Folgen Sie dem Ariadnefaden:

 @AriadneProjekt

 ariadneprojekt.de

Mehr zu den Kopernikus-Projekten des BMBF auf kopernikus-projekte.de

Wer ist Ariadne? Durch den Faden der Ariadne gelang Theseus in der griechischen Mythologie die sichere Navigation durch das Labyrinth des Minotaurus. Dies ist die Leitidee für das Energiewende-Projekt Ariadne. Im Konsortium von mehr als 25 Forschungseinrichtungen führt Ariadne durch einen gemeinsamen Lernprozess mit Politik, Wirtschaft und Gesellschaft, erforscht Optionen zur Gestaltung der Energiewende und erarbeitet wichtiges Orientierungswissen für politische Entscheider. Wir sind Ariadne:

adelphi | Brandenburgische Technische Universität Cottbus – Senftenberg (BTU) | Deutsche Energie-Agentur (dena) | Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) | Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) | Ecologic Institute | Fraunhofer Cluster of Excellence Integrated Energy Systems (CINES) | Guidehouse Germany | Helmholtz-Zentrum Hereon | Hertie School | Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen (HfWU) | ifok | Institut der deutschen Wirtschaft Köln | Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität | Institute For Advanced Sustainability Studies (IASS) | Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC) | Öko-Institut | Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) | RWI – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung | Stiftung 2° – Deutsche Unternehmer für Klimaschutz | Stiftung Umweltenergierecht | Technische Universität Darmstadt | Technische Universität München | Universität Greifswald | Universität Hamburg | Universität Münster | Universität Potsdam | Universität Stuttgart – Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) | ZEW – Leibniz-Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung