



# Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3

## -T45-Szenarien-

Modul Verkehr

---

Ort: Karlsruhe

Datum: 09.02.2024

## Impressum

---

### Langfristszenarien 3

#### Projektleitung

**Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI**

Breslauer Straße 48, 76139 Karlsruhe  
Dr. Frank Sensfuß, [frank.sensfuss@isi.fraunhofer.de](mailto:frank.sensfuss@isi.fraunhofer.de)

**Consentec GmbH**

Grüner Weg 1, 52070 Aachen  
Dr. Christoph Maurer, [maurer@consentec.de](mailto:maurer@consentec.de)

#### Verantwortlich für den Inhalt des Textes

Dr. Till Gnann, [till.gnann@isi.fraunhofer.de](mailto:till.gnann@isi.fraunhofer.de); Daniel Speth, [daniel.speth@isi.fraunhofer.de](mailto:daniel.speth@isi.fraunhofer.de);  
Dr. Michael Krail, [michael.krail@isi.fraunhofer.de](mailto:michael.krail@isi.fraunhofer.de); Prof. Martin Wietschel, [martin.wietschel@isi.fraunhofer.de](mailto:martin.wietschel@isi.fraunhofer.de)

#### Beteiligte Institute

**Consentec GmbH**

Grüner Weg 1, 52070 Aachen  
Dr. Christoph Maurer, [maurer@consentec.de](mailto:maurer@consentec.de) (Administrative Leitung)

**Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI**

Breslauer Straße 48, 76139 Karlsruhe  
Dr. Frank Sensfuß, [frank.sensfuss@isi.fraunhofer.de](mailto:frank.sensfuss@isi.fraunhofer.de) (Projektleitung)  
Gerda Deac, [gerda.deac@isi.fraunhofer.de](mailto:gerda.deac@isi.fraunhofer.de) (Projektmanagement)

**ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg**

Im Weiher 10, 69121 Heidelberg  
Peter Mellwig, [peter.mellwig@ifeu.de](mailto:peter.mellwig@ifeu.de)

**Technische Universität Berlin**

Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin  
Prof. Dr. Joachim Müller-Kirchenbauer, [jmk@er.tu-berlin.de](mailto:jmk@er.tu-berlin.de)

#### Verfasst im Auftrag von

**Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)**

Scharnhorststr. 34-37, 10115 Berlin

#### Veröffentlicht

Februar 2024

#### Hinweise

Dieser Bericht einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Die Informationen wurden nach bestem Wissen und Gewissen unter Beachtung der Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis zusammengestellt. Die Autorinnen und Autoren gehen davon aus, dass die Angaben in diesem Bericht korrekt, vollständig und aktuell sind, übernehmen jedoch für etwaige Fehler, ausdrücklich oder implizit, keine Gewähr. Die Darstellungen in diesem Dokument spiegeln nicht notwendigerweise die Meinung des Auftraggebers wider.

## Inhaltsverzeichnis

---

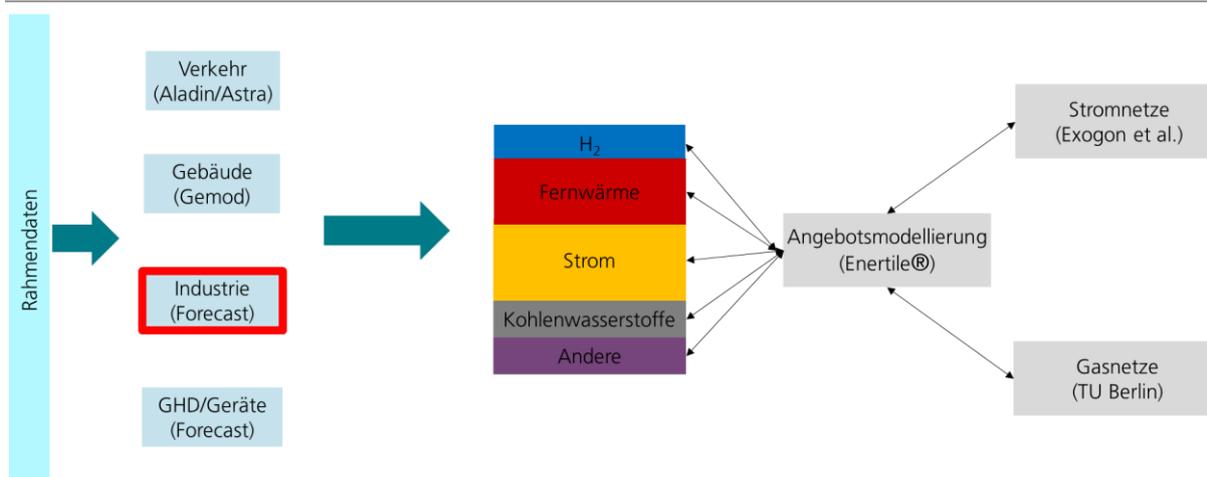
<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Methodik.....</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>Sektorspezifische Annahmen und Rahmendaten.....</b>	<b>8</b>
3.1	Energieträgerpreise.....	8
3.2	Infrastrukturverfügbarkeit .....	9
3.3	Fahrzeugparameter.....	10
3.4	Angenommene Maßnahmen .....	11
3.5	Veränderungen des Mobilitätsverhaltens.....	13
<b>4</b>	<b>Ergebnisse der Szenarien T45-Strom, T45-H<sub>2</sub> und T45-PtG/PtL .....</b>	<b>15</b>
4.1	Endenergiebedarf im Überblick.....	15
4.2	Verkehrs- und Fahrleistung .....	18
4.3	CO <sub>2</sub> -Emissionen .....	21
4.4	Flottenentwicklung .....	22
4.4.1	Pkw .....	22
4.4.2	Nutzfahrzeuge .....	24
4.5	Endenergiebedarf nach Verkehrsträgern .....	27
4.5.1	Pkw .....	27
4.5.2	Nutzfahrzeuge .....	28
4.5.3	Weitere Verkehrsträger.....	32
4.5.4	Regionaler Energiebedarf .....	33
4.6	Vergleich mit den TN-Szenarien .....	35
<b>5</b>	<b>Ergebnisse der Szenarien T45-RedEff, T45-RedGas.....</b>	<b>36</b>
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....</b>	<b>37</b>

# 1 Einleitung

Im Projekt „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland“ (Langfristszenarien 3) werden im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz Szenarien für die zukünftige Entwicklung eines treibhausgasneutralen Energiesystems modelliert. Die Modellierung umfasst das gesamte Energiesystem, also übergreifend die Erzeugung von Strom, Wärme und Wasserstoff sowie die Nachfrage nach Energie in den Sektoren Industrie, Verkehr, Gebäude und Geräte. Die Energieinfrastrukturen (Strom und Gase) werden ebenfalls mit modelliert. Im Fokus der Analyse steht dabei nicht die Entwicklung eines einzelnen „Leitszenarios“, sondern die Untersuchung von unterschiedlichen Szenariowelten, um durch die vergleichenden Analysen Erkenntnisse über die Vor- und Nachteile alternativer Pfade für die Transformation des Energiesystems zu gewinnen.

Somit können Pfadabhängigkeiten und robuste Entwicklungen auf dem Weg zur Treibhausgasneutralität identifiziert werden. Um die zunehmenden Wechselwirkungen zwischen den Sektoren adäquat zu erfassen, ist der Einsatz eines komplexen Modellverbunds nötig. Im Projekt Langfristszenarien 3 koppeln wir spezialisierte Sektormodelle für Gebäude, Industrie, Verkehr, GHD&Geräte<sup>1</sup>, Energieangebot, Gasnetze und Stromnetze, um eine möglichst hohe Auflösung zu erreichen.

**Abbildung 1: Modellverbund im Projekt**



In einem ersten Schritt wurden im Jahr 2021 drei Szenarien veröffentlicht, die jeweils stark auf den Einsatz eines Energieträgers für die Dekarbonisierung setzen (TN-Szenarien, siehe [www.langfristszenarien.de](http://www.langfristszenarien.de)). Der vorliegende Bericht ist Teil einer weiterführenden Szenariorechnung, welche die bereits veröffentlichten TN-Szenarien aktualisiert und das Klimaschutzgesetz entsprechend der Novelle im Jahr 2021 mit den Sektorzielen für das Jahr 2030 und dem Ziel der Treibhausgasneutralität im Jahr 2045 berücksichtigt. Diese aktualisierten Grundszenarien, T45-Strom, T45-PtG/PtL, T45-H2, orientieren sich an ähnlichen drei Szenariowelten wie bereits die TN-Szenarien. Das Szenario T45-Strom setzt auf eine starke Elektrifizierung des Energiesystems, um Treibhausgasneutralität zu erreichen. Das Szenario T45-H2 setzt auf eine starke Nutzung von Wasserstoff im Energiesystem. Das Szenario T45-PtG/PtL setzt auf eine starke Nutzung von synthetischen Kohlenwasserstoffen im Energiesystem.

<sup>1</sup> Gewerbe, Handel und Dienstleistung sowie Haushaltsgeräte

Der nachfolgende Bericht umfasst den Verkehrsteil der drei Langfristszenarien, welche die Klimaziele bis 2045 einhalten (T45-Szenarien). Zudem sind Variationsrechnungen für eine niedrigere Effizienz und einen geringeren Gasverbrauch enthalten.

Der Bericht gliedert sich wie folgt: Im zweiten Abschnitt wird auf die Modellierungsmethodik im Verkehr eingegangen, die Annahmen folgen in Abschnitt 3. Abschnitt 4 umfasst die Ergebnisse der Hauptszenarien, bevor sich die Variationsrechnungen in Abschnitt 5 anschließen. Zuletzt erfolgt eine Zusammenfassung und Schlussfolgerungen (Abschnitt 6).

## 2 Methodik

---

Die Modellierung der Verkehrsnachfrage, der Diffusion alternativer Antriebe und die daraus resultierende Abschätzung des Endenergieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen des Sektors Verkehr basiert, wie bereits in Pfluger et al. (2017) beschrieben, auf drei Säulen:

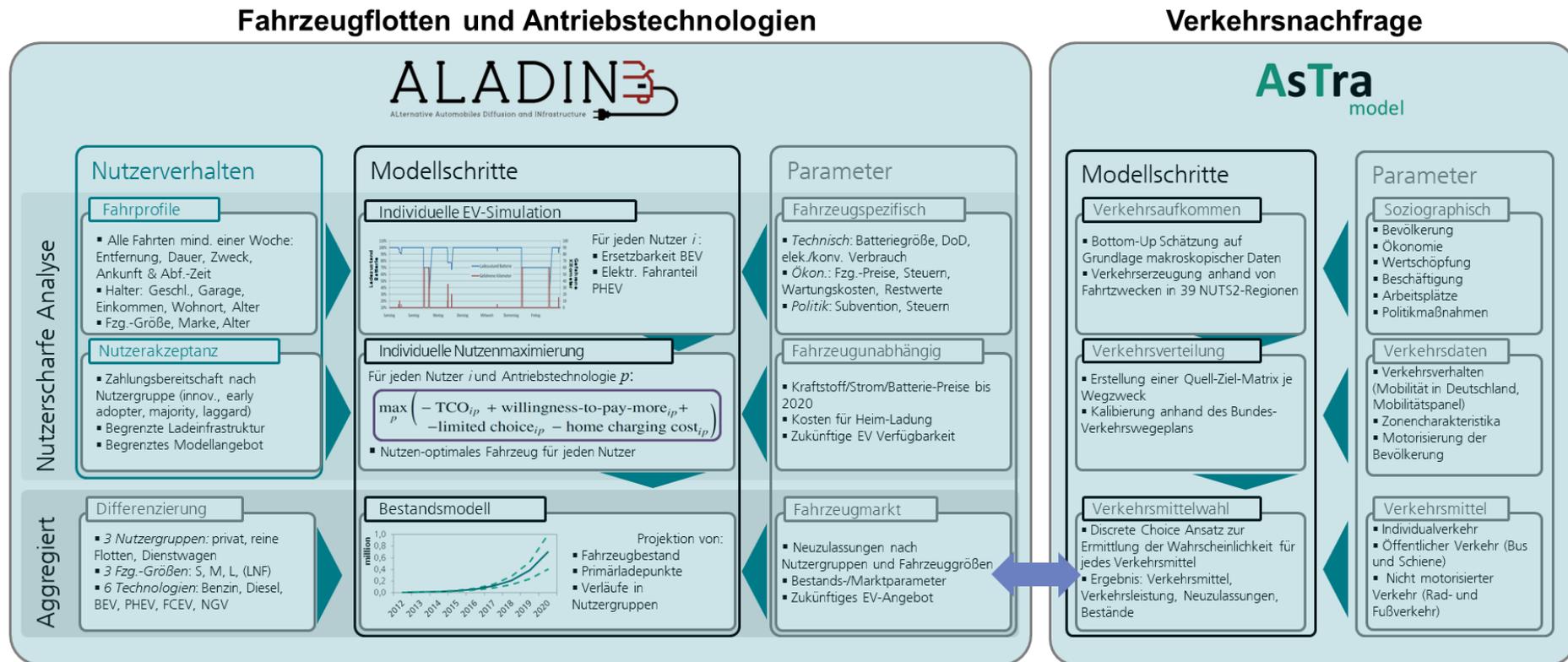
- Bodengebundener, territorialer Verkehr (inkl. Binnenschifffahrt)
- Luftverkehr
- Seeschifffahrt

Die Nachfrage nach bodengebundenem Verkehr auf deutschem Territorium wird mit dem *ASTRA-M* Modell modelliert, während die Nachfrage im Luft- und Seeverkehr basierend auf bestehenden Studien ermittelt wird. Die Nachfrage wird durch den Fahrzeugbestand, das Verkehrsaufkommen und den Modal Split - also die Verteilung des Verkehrsaufkommens auf verschiedene Verkehrsträger - beschrieben.

Zur agentenbasierten Modellierung der Kaufentscheidung und Antriebswahl wird das Modell *ALADIN* - Alternative Antriebe Diffusion und Infrastruktur - verwendet. Für die Langfristszenarien 3 wurde *ALADIN* erweitert, so dass nun, neben Pkw- und Lkw-Kaufverhalten, auch die langfristige Energienachfrage bei Binnenschiffen, Seeschiffen und Flugzeugen abgebildet werden kann.

Abbildung 2 zeigt beispielhaft das Zusammenspiel zwischen *ASTRA-M* und *ALADIN* für Pkw. Dabei ermittelt *ASTRA-M* anhand von soziographischen Parametern (Altersgruppe, Einkommensgruppe, Beschäftigungsstatus und NUTS-II Zone) und Verkehrsdaten das Verkehrsaufkommen sowie den Modal Split. Anschließend wird der Anteil der einzelnen Verkehrsträger - die Verkehrsmittelwahl - modelliert. Darauf basierend erhält *ALADIN* die in *ASTRA-M* ermittelten Neuzulassungen, Bestände und Verkehrsleistungen der einzelnen Verkehrsmittel, also beispielsweise die jahresscharfen Neuzulassungen von Pkw, deren Bestand sowie Fahrleistung. *ALADIN* ermittelt dann die nutzenoptimale Antriebswahl der einzelnen Agenten zum Zeitpunkt der Anschaffung unter Berücksichtigung technischer und ökonomischer Restriktionen. Vereinfacht dargestellt ermittelt *ASTRA-M* also den Bestand sowie die Neuzulassungen der Fahrzeugflotten und berechnet die damit zurückgelegte Verkehrsleistung. *ALADIN* bestimmt daraufhin mit welcher Antriebstechnologie die Fahrzeuge ausgestattet werden. .

Abbildung 2: Verknüpfung zwischen den Modellen *ASTRA-M* und *ALADIN*



## 3 Sektorspezifische Annahmen und Rahmendaten

---

Die im Rahmen der ersten Modellierungsrunde der Langfristszenarien 3 veröffentlichten "TN-Szenarien" hatten das Ziel, Treibhausgasneutralität 2050 zu erreichen (Krail et al. 2021). Die hier vorliegenden "T45-Szenarien" tragen aktuellen politischen Entwicklungen Rechnung und haben das Ziel Treibhausgasneutralität bereits 2045 zu erreichen (Deutscher Bundestag 2021). Außerdem sollen die gesetzlich festgelegten CO<sub>2</sub>-Einsparziele der einzelnen Sektoren im Jahr 2030 erreicht werden (Deutscher Bundestag 2021). Dafür werden verschiedene Anpassungen in den Rahmendaten vorgenommen.

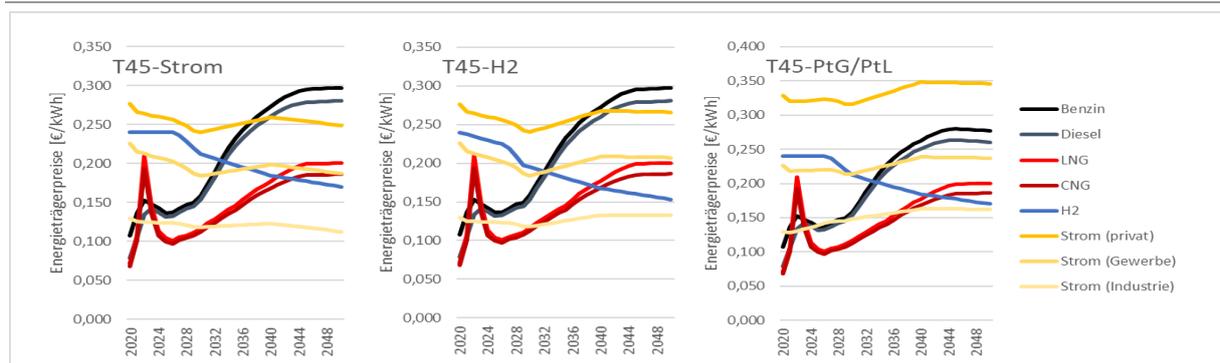
### 3.1 Energieträgerpreise

Die Endenergiepreise für den Verkehr beruhen auf den für die T45-Szenarien der Langfristszenarien festgelegten Energieträger- und CO<sub>2</sub>-Preisen sowie den dort unterstellten Beimischungsquoten für synthetische Kraftstoffe (Sensfuss et al. 2022). Die grundsätzliche Umrechnung von Energieträgerpreisen auf Endenergiepreise folgt jedoch weiterhin der in Krail et al. (2021) vorgestellten Methodik. Zusätzlich wurden in allen Szenarien bereits beschlossene Maßnahmen beziehungsweise sehr wahrscheinliche Maßnahmen, die zum Zeitpunkt des Startes der Modellierung angedacht waren, berücksichtigt. In Bezug auf die Endenergiepreise im Verkehr betrifft dies insbesondere zwei Maßnahmen. Zum einen wird davon ausgegangen, dass die Reduzierung der Energiesteuer auf Diesel ab 2023 abgeschafft und basierend auf dem CO<sub>2</sub>-Gehalt von Diesel etwas über das Niveau der Energiesteuer von Benzin angehoben wird (SPD et al. 2021) (European Commission 2021a). Außerdem wird die Abschaffung der EEG-Umlage (SPD et al. 2021) ab 2023 berücksichtigt.<sup>2</sup>

Um die Szenarien hinsichtlich der Endenergiepreise zu differenzieren, wird, analog zur vorherigen Modellierungsrunde, von szenariospezifischen Preisabsenkungen ausgegangen. Dafür wird in den Szenarien *T45-H<sub>2</sub>* und *T45-PtG/PtL* jeweils von einer Energiepreisreduktion in Höhe von 2 €/kWh auf Wasserstoff beziehungsweise auf synthetische Gas- und Flüssigkraftstoffe gegenüber dem Referenzpfad ausgegangen. Die Höhe der Reduktion leitet sich aus in der Vergangenheit üblichen Maßnahmen, wie beispielsweise die Energiesteuerreduktion auf verdichtetes Erdgas (Compressed Natural Gas, CNG) und verflüssigtes Erdgas (Liquefied Natural Gas, LNG) bis 2026, ab, stellt jedoch keine politische Handlungsempfehlung dar. Ähnliche Effekte können mit unterschiedlichen Maßnahmen erreicht werden. Im Szenario *T45-Strom* wird mittelfristig, analog zur vorherigen Modellierungsrunde, von einer Absenkung des Strompreises in Höhe von 5 €/kWh ausgegangen, im Szenario *T45-H<sub>2</sub>* wurde eine Absenkung von 2 €/kWh für Strom angenommen. Diese Reduktion kann beispielsweise durch gesteuertes Laden sowie die verstärkte Nutzung von Photovoltaik-Strom erreicht werden. Abbildung 3 stellt die Entwicklung der Endenergiepreise in den Szenarien *T45-Strom*, *T45-H<sub>2</sub>* und *T45-PtG/PtL* dar.

---

<sup>2</sup> Die Abschaffung der EEG-Umlage zum 1.7.2022 aufgrund der Ukraine-Krise trat erst nach der Berechnung der Ergebnisse in Kraft. Die Veränderungen sind aber nicht gravierend, da der Anstieg des Strompreises die Absenkung kompensiert.

**Abbildung 3: Endenergiepreise exklusive Mehrwertsteuer für den Verkehr**

### 3.2 Infrastrukturverfügbarkeit

Die verfügbare Tank- bzw. Ladeinfrastruktur hat einen deutlichen Einfluss auf die Einsatzfähigkeit und damit die Verbreitung alternativer Antriebe.

Für Pkw, die aufgrund ihrer Fahrleistung häufig zuhause oder an der Arbeitsstelle geladen werden können, wird der Aufbau einer entsprechenden privaten oder halböffentlichen Ladeinfrastruktur in der Kostenstruktur der Fahrzeuge abgebildet. Aufgrund des bereits begonnen Markthochlaufs batterieelektrischer Antriebe und dem gleichzeitigen Entstehen öffentlicher Schnellladeinfrastruktur wird davon ausgegangen, dass diese in allen Szenarien zur Verfügung steht. Die vorherige Modellierungsrunde der Langfristszenarien 3 hat gezeigt, dass Wasserstoff für Pkw nur im Szenario *TN-H<sub>2</sub>* in relevanten Mengen eingesetzt wird (Krail et al. 2021). Daher wird hier davon ausgegangen, dass eine entsprechende Infrastruktur nur im Szenario *T45-H<sub>2</sub>* zur Verfügung steht.

Bei Nutzfahrzeugen hat die öffentliche Tank- und Ladeinfrastruktur, aufgrund der hohen Fahrleistung, eine nochmals höhere Bedeutung als bei Pkw. Die Ergebnisse der vorherigen Modellierungsrunde haben gezeigt, dass die öffentliche Infrastruktur einen hohen Einfluss auf die Flottenzusammensetzung hat. Um eine möglichst hohe Bandbreite abzudecken, wird die Infrastruktur daher zwischen den Szenarien variiert.

Im Szenario *T45-Strom* wird, in Anlehnung an die Methodik in Speth et al. (2022), davon ausgegangen, dass eine öffentliche Schnellladeinfrastruktur für Nutzfahrzeuge aufgebaut wird. Diese erlaubt es 2045 jedem Fahrzeug, falls notwendig, einmal täglich öffentlich nachzuladen, was die Reichweite der Fahrzeuge verdoppelt. Zusätzlich werden weiterhin bis 2045 8.000 km des Straßennetzes mit Oberleitungen elektrifiziert. Auf eine Wasserstofftankstelleninfrastruktur wird hingegen verzichtet. Im Szenario *T45-H<sub>2</sub>* wird stattdessen eine Wasserstofftankstelleninfrastruktur aufgebaut, die ab 2030 einen uneingeschränkten Betrieb von Wasserstoff-Nutzfahrzeugen ermöglicht. Es steht jedoch keine öffentliche Ladeinfrastruktur zur Verfügung. Batterieelektrische Fahrzeuge können nur an der privaten Depotinfrastruktur nachgeladen werden.

Im Szenario *T45-PtG/PtL* wird weiterhin die vorhandene Tankstelleninfrastruktur genutzt. Der Infrastrukturaufbau bleibt damit bewusst hinter dem Kommissionsvorschlag zur Alternative Fuels Infrastructure Regulation zurück, der den zeitgleichen Aufbau von Wasserstoff- und Ladeinfrastruktur für Nutzfahrzeuge vorsieht (European Commission 2021b). Ziel ist es, eine möglichst große Bandbreite der Szenarien abzudecken. Würde im Szenario *T45-H<sub>2</sub>* zusätzlich eine öffentliche Ladeinfrastruktur installiert, wäre, aufgrund des Effizienz- und Kostenvorteiles des elektrischen Antriebs, mit einem deutlich höheren Anteil batterieelektrischer Fahrzeuge zu rechnen. Eine Wasserstofftankstelleninfrastruktur hätte im Szenario *T45-Strom* hingegen nur geringe Auswirkungen auf die Flottenstruktur und den Endenergiebedarf.

### 3.3 Fahrzeugparameter

Batterie- und Brennstoffzellenpreise sind wesentliche Einflussparameter für die Kaufentscheidung bei alternativen Antrieben. Die Annahmen folgen hier der vorherigen Modellierungsrunde. Für eine tiefere Erläuterung sei auf Krail et al. (2021) verwiesen. Tabelle 1 und Tabelle 2 stellen die Entwicklung der Batterie- und Brennstoffzellenpreise dar. Für die Batteriepreise wird zwischen reinen Elektrofahrzeugen (Battery Electric Vehicles, BEV) und Plug-in Hybriden (Plug-in Hybrid Electric Vehicles, PHEV) unterschieden.

**Tabelle 1: Batteriepreise im Verkehr**

Systemkosten exklusive Mehrwertsteuer (MwSt.)

	Einheit	2020	2030	2040	2050	
<b>T45-Strom</b>	<b>BEV</b>	EUR/kWh	240	100	90	80
	<b>PHEV</b>	EUR/kWh	264	110	98	88
<b>T45-PtG/PtL</b>	<b>BEV</b>	EUR/kWh	240	120	120	120
	<b>PHEV</b>	EUR/kWh	264	132	132	132
<b>T45-H<sub>2</sub></b>	<b>BEV</b>	EUR/kWh	240	100	100	100
	<b>PHEV</b>	EUR/kWh	264	110	110	110

Quelle: eigene Annahmen, basierend auf Lutsey (2017), Zapf et al. (2019)

**Tabelle 2: Brennstoffzellenpreise im Verkehr**

Systemkosten exklusive Mehrwertsteuer (MwSt.)

	Einheit	2020	2030	2040	2050
<b>T45-H<sub>2</sub></b>	EUR/kW	234	78	62	50

Quelle: eigene Annahmen, basierend auf Zapf et al. (2019), Hülsmann et al. (2014), Mottschall et al. (2019)

Neben den Batteriepreisen spielt auch die Batteriekapazität der Fahrzeuge eine entscheidende Rolle. Sie beeinflusst sowohl die Reichweite der Fahrzeuge als auch die Investition. Für Pkw entspricht die unterstellte Batteriekapazität der Batteriekapazität der vorherigen Modellierungsrunde. Für schwere Nutzfahrzeuge wird die Batteriekapazität leicht erhöht, um aktuellen Entwicklungen der Hersteller gerecht zu werden. Die angenommene Reichweite liegt in den hier vorliegenden Szenarien langfristig bei 500 km. Tabelle 3 und Tabelle 4 fassen die entsprechenden Annahmen für Pkw und Lkw zusammen.

**Tabelle 3: Angenommene Entwicklung der Batteriekapazität bei Pkw**

Nutzbare Kapazität bei BEV 90 %, bei PHEV 80 % in kWh

		2020	2030	2050
<b>BEV</b>	klein	25	38	38
	mittel	45	69	69
	groß	73	100	100

<b>PHEV</b>	klein	8	12	12
	mittel	11	22	22
	groß	16	31	31

**Tabelle 4: Angenommene Entwicklung der Batteriekapazität bei Nutzfahrzeugen**

Nutzbare Kapazität: 90 %

		Einheit	2020	2030	2050
<b>BEV</b>	<3,5t	kWh	65	65	92
	3,5-7,5t	kWh	125	160	176
	7,5-12t	kWh	165	200	246
	>12t	kWh	241	352	557
	SZM	kWh	287	411	650
<b>PHEV</b>	<3,5t	kWh	33	43	61
	3,5-7,5t	kWh	81	107	117
	7,5-12t	kWh	110	133	164
<b>HO-BEV</b>	>12t	kWh	169	169	169
	SZM	kWh	200	200	200

Quelle: Eigene Annahme, basierend auf Wietschel et al. (2017)

Die weiteren Annahmen zu Fahrzeuginvestitionen, Wartungskosten und Verbräuchen entsprechen den Annahmen der vorherigen Modellierungsrunde und sind in Krail et al. (2021) im Anhang dokumentiert.

Für die weiteren Verkehrsträger (Bus-, Schienen-, Schiffs- und Luftverkehr) werden die Annahmen aus der vorherigen Modellierungsrunde übernommen (Krail et al. 2021).

### 3.4 Angenommene Maßnahmen

Die hier vorgestellten Szenarien bauen auf den treibhausgasneutralen Szenarien der vorherigen Modellierungsrunde auf und die dort genannten technologischen und energiepolitischen Annahmen gelten weiterhin. Alle hier vorgestellten Maßnahmen sind nicht als Handlungsempfehlungen zu verstehen, sondern verdeutlichen die für die Modellierung genutzten Rahmenparameter. Ähnliche Effekte können auch mit anderen Maßnahmen erreicht werden:

- Verbesserung der Schieneninfrastruktur durch zusätzliche Förderung des Bundes in Höhe von 11 Mrd. Euro. Dies beeinflusst vorrangig die Kapazität der Schieneninfrastruktur.
- Verringerung der Preise der Bahnfahrkarten durch Senkung der Mehrwertsteuer von 19 auf 7 % ab dem Jahr 2021. Es wird angenommen, dass sich die Steuerreduktion zu 100 % auf die Senkung der Ticketpreise auswirkt.

- Stärkung des Öffentlichen Personennachverkehrs (ÖPNV) durch weitere finanzielle Mittel des Bundes (Erhöhung der GVFG<sup>3</sup>- (2 Mrd. EUR) und Regionalisierungs-Mittel (Dynamisierung 1,8 % p.a.)). Die Maßnahme wirkt sich auf die Kapazität und die Taktung im ÖPNV aus und bewirkt eine leichte Verringerung der Fahrtzeiten (inkl. Warte- und Zugangszeiten).
- Einführung einer Luftverkehrsabgabe ab 2025. Die Maßnahme wirkt sich positiv auf die Verkehrsmittelwahl bei mittleren bis langen Distanzen aus.
- Verbesserung der Sicherheit und der Infrastruktur für das Radfahren durch die StVO Novelle.
- Umsetzung der europäischen Vorgaben der transeuropäischen Verkehrsnetze in Form einer Verbesserung der Infrastruktur.
- Europäische Regulierungen für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge zu CO<sub>2</sub>-Standards bis 2030. Die Regelungen werden in Form von Effizienzmaßnahmen der Hersteller berücksichtigt. Sie führen, abhängig von Fahrzeuggröße und Antriebsart, zu einer Reduktion des Endenergiebedarfs von bis zu 16 %.
- Einführung eines Tempolimits von 130 km/h in 2023 auf deutschen Bundesautobahnen. Dies reduziert den Endenergiebedarf der Fahrzeuge.
- Zunahme der Kosten des motorisierten Individualverkehrs (MIV) um 5 % im städtischen Bereich durch Maßnahmen im Bereich Nahmobilität (z.B. Parkraumbewirtschaftung). Dies führt zu einer geringeren Pkw-Nutzung.
- Steigender Anteil von Fahrzeugen mit Automatisierungsfunktionen der Level 3 und 4. Die Maßnahme bewirkt sinkenden Durchschnittsverbrauch und einen verbesserten Verkehrsfluss auf Bundesautobahnen.
- Reduktion der Trassenpreise im Personenverkehr auf der Schiene um 10 % und im Schienengüterverkehr um 40 % ab 2023.
- Zusätzliche Investitionen in den Ausbau der Fahrrad- und Fußgängerinfrastruktur. Dies führt zu einem moderaten Rückgang der Fahrt- bzw. Wegezeiten um 5 % bis 2045.
- Rückgang der Fahrtzeiten im Radverkehr bis 2045 um max. 20 % durch einen zunehmenden Anteil von Pedelecs und S-Pedelecs. Dies führt zu Verkehrsverlagerung.
- Verbesserung der Taktung im öffentlichen Nahverkehr. Dies führt zu einem Rückgang der Wartezeiten und damit der gesamten Fahrtzeiten bis 2045.
- Implementierung ECTS Level 2 bis 2045 auf allen Hauptstrecken im Schienenverkehr. Dies bedeutet einen Rückgang der Fahrtkosten im Schienengüterverkehr um 3 % (1,6 % bis 2030) und der Fahrtzeiten um 4 % bis 2045.
- Einführung des Deutschlandtakts der Bahn ab 2025. Die Maßnahme führt zu einer um 10 % reduzierten Fahrzeit für Fernreisende im Bahnverkehr.
- Verbesserung der Zugbeladung durch Ausbau 740 m Gleise, welche die Nutzung längerer Züge erlaubt und damit die höhere Beladung des einzelnen Zuges. Bis 2030 ergibt sich eine Verbesserung der Ladefaktoren um 8 %, bis 2050 um 20 %.
- Förderung des Vor- und Nachlaufes im Kombinierten Verkehr mit 50 % der Kosten 2022. Dies führt zu einer Verbesserung der Beladungsfaktoren im Schienengüterverkehr um 5 % bis 2045.

---

<sup>3</sup> Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz

- Verbesserung der Beladungsfaktoren auf Binnenschiffen um 5 % bis 2030.
- Einführung der CO<sub>2</sub>-differenzierten Maut mit Entlastung der Null-Emissions-Lkw.

Angepasst gegenüber der vorherigen Modellierungsrunde werden insbesondere die folgenden Aspekte:

- Die Innovations- und Umweltprämie wird bis 2025 verlängert. Ein schrittweises Abschmelzen der Prämie bis 2027 wird berücksichtigt. Plug-in Hybride müssen einen elektrischen Fahranteil von mindestens 50 % erreichen (SPD et al. 2021).
- Die Reduktion der Dienstwagenbesteuerung für batterieelektrische Fahrzeuge von 1 % auf 0,25 % sowie für Plug-in Hybride mit mindestens 50 % elektrischem Fahranteil von 1 % auf 0,5 % wird bis 2030 verlängert (SPD et al. 2021).
- Bis 2030 werden die Mehrkosten beim Kauf gegenüber dem Diesel-Fahrzeug für elektrifizierte Lkw, inklusive Brennstoffzellen-Lkw, zu 80 % subventioniert (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur 2021).
- Es wird davon ausgegangen, dass die aktuelle Mautbefreiung für elektrifizierte Nutzfahrzeuge inklusive Plug-in Hybriden und Brennstoffzellenfahrzeugen bis 2030 weiterhin gilt.
- Es wird davon ausgegangen, dass die Restwerte von Verbrennerfahrzeugen bis 2035 auf Null sinken, da dann beispielsweise Zufahrtsbeschränkungen in Innenstädte, hohe Kraftstoffpreise, etc. einen Wiederverkauf kaum möglich machen. Die Restwerte für Pkw sinken im Szenario *T45-Strom* und *T45-H<sub>2</sub>* daher von 100 % des Restwertes ab 2025 linear absteigend auf 0 % des Restwertes ab 2035. Ein 2035 gekaufter Verbrenner hat also keinen Restwert mehr.

Im Rahmen der T45-Szenarien werden zudem erstmals die Flottengrenzwerte für Pkw explizit im Modell ALADIN abgebildet. Die deutlich verschärften Flottengrenzwerte im Rahmen des Fit-for-55-Pakets der EU (55 % Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes der Neuwagenflotte im Jahr 2030 ggü. 2021 und 100 % Reduktion bis 2035) machen diese Anpassung notwendig. Aktuell ist trotz der Förderung keine deutliche Ambition der Fahrzeughersteller zu erkennen, mehr Fahrzeuge zu verkaufen, als für die Flottengrenzwerte notwendig. Im Rahmen der T45-Szenarien wird davon ausgegangen, dass die Hersteller auf kurze Sicht nur so viele Fahrzeuge verkaufen, wie es für die Einhaltung der Flottengrenzwerte notwendig ist. Mittel- bis langfristig wechseln sie aber zu einer marktorientierten Angebotsseite bis 2035, um wettbewerbsfähig zu bleiben. Dies ist ein Mittelweg zwischen den beiden aufgezeigten Extrema in Gnann et al. (2022).

### 3.5 Veränderungen des Mobilitätsverhaltens

Zusätzlich zu den vorgestellten politischen Maßnahmen wurden bei allen T45-Szenarien noch moderate Verstetigungseffekte der aus der COVID19 Pandemie resultierenden Verhaltensänderungen im Personenverkehr angenommen. Die während der Pandemie beobachteten deutlichen Steige-

rungen der Nutzung von Homeoffice und des Rückgangs von Reisen zu dienstlichen Zwecken zeigen nach Auswertungen von Umfragen<sup>45</sup> aus den Jahren 2021 und 2022, dass zumindest teilweise Änderungen im Mobilitätsverhalten im Pendelverkehr und bei Dienstreisen auch nach Beendigung der COVID19-Pandemie bestehen bleiben. So zeigen die Umfragen zur Nutzung von Homeoffice, dass sowohl Unternehmen als auch Beschäftigte Homeoffice in bestimmten Grenzen weiterhin für sinnvoll erachten. Aus den Auswertungen resultieren dabei Änderungen der Pendelwege durch Homeoffice um 11 % bis 17 % unter Berücksichtigung der tatsächlichen Anzahl der Beschäftigten, die Homeoffice auch technisch und organisatorisch realisieren können. In den Szenarien wurde mit einem Rückgang der Pendelwege um 11 % gerechnet.

Im Bereich der Dienstreisen ergaben die Umfragen, dass Beschäftigte im Durchschnitt ähnlich wie beim Homeoffice eine gemischte Form der Nutzung von virtuellen und physischen Meetings auch nach der Pandemie bevorzugen. Die Auswertungen der Umfragen lassen den Rückschluss zu, dass dienstliche Reisen auch nach der Pandemie noch zwischen 17 % und 24 % zurückgehen können. Hier wurde in den Szenarien der untere Rand des Rückgangs angenommen. Da im Bereich der nationalen, dienstlichen Reisen die Bahn einen vergleichbar hohen Modal Anteil hat, wirkt sich dies auch stärker auf die Entwicklung der Verkehrsnachfrage auf der Schiene als auf anderen Verkehrsträgern aus.

Gleichzeitig hat sich während der Pandemie gezeigt, dass der Rückgang der Wege für die Zwecke Pendeln und Dienstreisen einhergegangen ist mit einem moderaten Anstieg der privaten und touristischen Wege. Hier wurde auf Basis der Auswertungen des RKI Mobility Report (Brockmann et al. 2022) ein Anstieg von jeweils 4 % angenommen.

---

<sup>4</sup> Berücksichtigte Umfragen zur Verstetigung bei dienstlichen Reisen:

Verband deutsches Reisemanagement (2021, 2022): <https://www.springerprofessional.de/risikomanagement/gesundheitspraevention/nach-corona-wird-es-deutlich-weniger-dienstreisen-geben/19142180>, <https://www.vdr-service.de/corona/ergebnisse-der-vdr-barometerumfrage-zum-coronavirus-covid-19-corporates-2022>

Handelsblatt (2021): <https://www.handelsblatt.com/karriere/video-statt-flug-bis-zu-50-prozent-weniger-was-die-dax-konzerne-bei-dienstreisen-nach-der-pandemie-planen/27136032.html?ticket=ST-2425856-TDRgSuBYzXtc2dJc4yuB-ap2>

PriceWaterhouseCouters (2021): <https://www.strategyand.pwc.com/de/de/industrie-teams/gesundheitswesen/arbeitnehmerbefragung-coronavirus.html>

<sup>5</sup> Berücksichtigte Umfragen zur Verstetigung bei der Nutzung von Home Office:

Statista (2021): <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1196192/umfrage/umfrage-zum-homeoffice-nach-der-corona-krise/>

IHK (2021): <https://www.ihk-berlin.de/politische-positionen-und-statistiken-channel/arbeitsmarkt-beschaeftigung/fachkraeftesicherung/digitalisierung-der-arbeitswelt/ihk-kurzumfrage-home-office-neue-normalitaet-oder-4876982>

Bundesverbands Digitale Wirtschaft (2021): <https://nwx.new-work.se/themenwelten/unternehmen/bvdw-umfrage-arbeitswelt-nach-corona-wie-machen-wir-weiter>

DAK (2021): <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/unternehmen/home-office-mitarbeiter-101.html>

Bitkom (2021): <https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Nach-Home-Office-zurueck-ins-Buero>

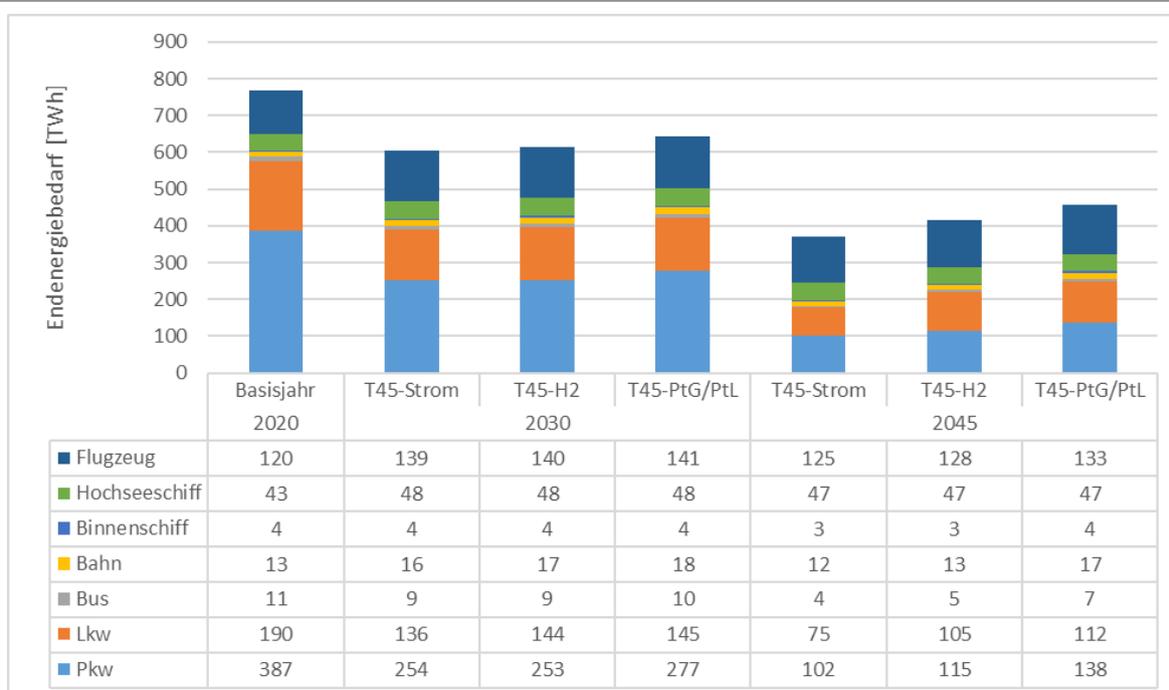
## 4 Ergebnisse der Szenarien T45-Strom, T45-H<sub>2</sub> und T45-PtG/PtL

Im Folgenden wird zunächst auf das Kernergebnis - den Endenergiebedarf des Verkehrs im Überblick (Abschnitt 4.1) - eingegangen. Anschließend werden die weiteren Ergebnisse zur Verkehrsnachfrage (Abschnitt 4.2), Treibhausgasemissionen (Abschnitt 4.3), Flottenentwicklung (Abschnitt 4.4) und dem Endenergiebedarf nach Verkehrsträgern im Detail erläutert (Abschnitt 4.5). Den Abschluss bildet ein Vergleich mit den TN-Szenarien aus der vorherigen Modellierungsrunde (Abschnitt 4.6).

### 4.1 Endenergiebedarf im Überblick

Abbildung 4 stellt den Endenergiebedarf des Verkehrssektors in den Szenarien *T45-Strom*, *T45-H<sub>2</sub>* und *T45-PtG/PtL* aufgeschlüsselt nach Verkehrsträgern dar. Für das Zwischenziel 2030 wird unter den hier getroffenen Annahmen für die Szenarien *T45-Strom* und *T45-H<sub>2</sub>* eine Reduktion des Endenergiebedarfs um circa 20 % erreicht. Das Szenario *T45-PtG/PtL* erreicht eine Reduktion um 16 %. Abhängig vom gewählten Szenario sinkt der Endenergiebedarf bis 2045 auf 456 TWh (*T45-PtG/PtL*), 416 TWh (*T45-H<sub>2</sub>*) oder 370 TWh (*T45-Strom*) ab. Damit wird im Szenario *T45-Strom* der Endenergiebedarf des Verkehrssektors gegenüber dem heutigen Endenergiebedarf halbiert. In den Szenarien *T45-H<sub>2</sub>* und *T45-PtG/PtL* beträgt die Reduktion 46 % beziehungsweise 40 %. Die Entwicklung der einzelnen Verkehrsträger fällt dabei unterschiedlich aus.

**Abbildung 4: Endenergiebedarf des Verkehrs nach Verkehrsträgern in den Szenarien T45-Strom, T45-H<sub>2</sub> und T45-PtG/PtL**



Im *Pkw-Verkehr* geht die Endenergienachfrage gegenüber 2020 bis 2045, je nach Szenario um 64 % bis 74 % zurück. Die stärkste Reduktion wird im Szenario *T45-Strom* erreicht, das am deutlichsten von der hohen Effizienz batterieelektrischer Antriebe profitiert. Der Anteil der Pkw am Gesamtenergiebedarf im Verkehrssektor sinkt von heute über 50 % auf maximal 30 % 2045 ab. Im Vergleich zu

anderen Verkehrsträgern stehen im Pkw-Verkehr Elektrifizierungsoptionen schon heute zur Verfügung, so dass eine nahezu vollständige Umstellung auf die direkte Nutzung elektrischer Energie realisierbar erscheint.

Ähnlich wie beim Pkw-Verkehr existieren auch im *Lkw-Verkehr* Optionen zum Einsatz elektrischer Antriebe. Abhängig davon, in welchem Umfang auf batterieelektrische Lkw zurückgegriffen werden kann, kann der Endenergiebedarf für Lkw bis 2045 um 40 % (*T45-PtG/PtL*), 45 % (*T45-H<sub>2</sub>*) oder bis zu 60 % (*T45-Strom*) reduziert werden. Im Vergleich zum Szenario *TN-Strom* wurde im Szenario *T45-Strom* zusätzlich eine Schnellladeinfrastruktur für batterieelektrische Lkw modelliert. Diese ermöglicht eine weitere Reduktion des Endenergiebedarfs um circa zehn Prozentpunkte.

Bei *Bussen* findet bis 2045 ebenfalls eine Reduktion des Endenergiebedarfs statt, die - abhängig vom Szenario - zwischen knapp 40 % und 60 % liegt. Die Entwicklung ähnelt der der Lkw und hängt vom Elektrifizierungsgrad der Busflotte ab. Insgesamt sind Busse für weniger als 1 % des Endenergiebedarfs 2045 verantwortlich.

Aufgrund des steigenden Verkehrsaufkommens nimmt der Endenergiebedarf im *Bahnverkehr* mittelfristig leicht zu. In den Szenarien *T45-Strom* und *T45-H<sub>2</sub>* kann dieser Effekt durch den vollständigen Umstieg auf effizientere Antriebsalternativen kompensiert werden. Im Szenario *T45-PtG/PtL* steigt der Endenergiebedarf im Bahnverkehr bis 2045 um ein Viertel an.

Der Endenergiebedarf in der *Binnenschifffahrt* ist in allen Szenarien weitestgehend konstant. Durch teilweise Elektrifizierung beziehungsweise die Umstellung auf Wasserstoff kann der Endenergiebedarf in den Szenarien *T45-Strom* und *T45-H<sub>2</sub>* bis 2045 um eine TWh gesenkt werden. Mit unter 1 % des Endenergiebedarfs 2045 ist die Binnenschifffahrt von nachrangiger Bedeutung.

Der Endenergiebedarf der *Hochseeschifffahrt* steigt in allen Szenarien von 43 TWh auf 47 TWh leicht an. Der Anstieg des Verkehrsaufkommens wird dabei durch ambitionierte Effizienzsteigerungen gepuffert. Die relative Bedeutung der Hochseeschifffahrt für den Energiebedarf nimmt jedoch zu. Bis 2045 steigt ihr Anteil von heute 6 % des Endenergiebedarfs auf 10 % (*T45-PtG/PtL*) beziehungsweise sogar auf 13 % (*T45-Strom*) an. Der Einsatz alternativer Antriebssysteme erscheint in der Hochseeschifffahrt nach derzeitigem Wissensstand nicht oder nur in sehr begrenztem Umfang möglich.

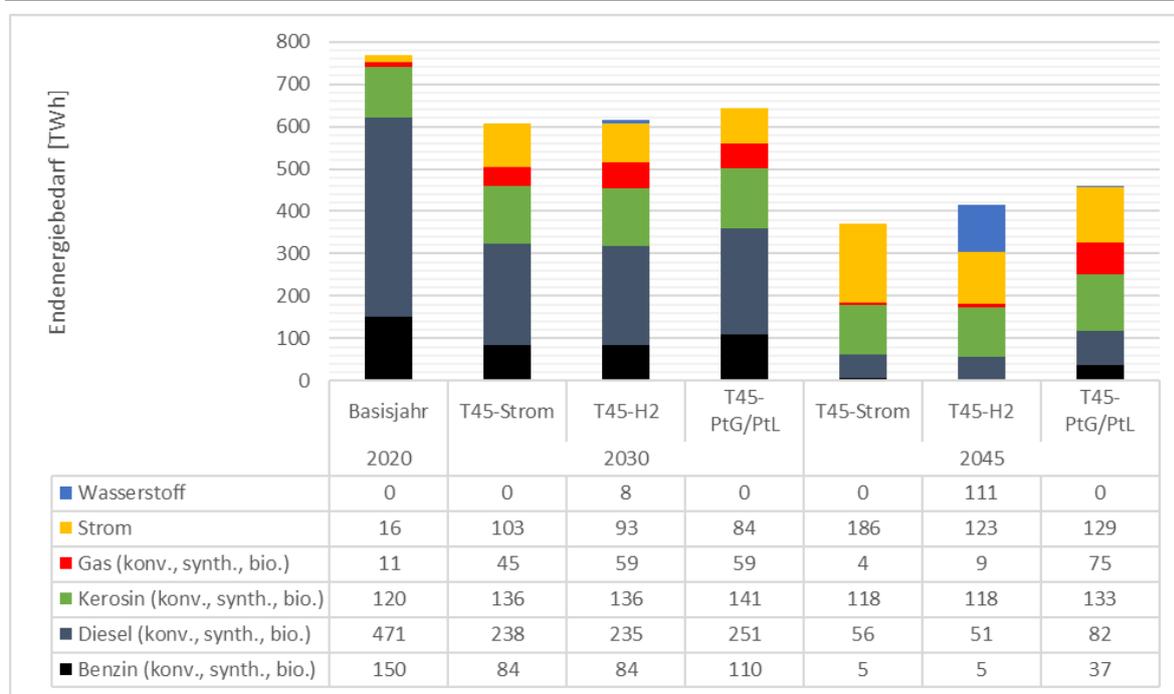
Im *Flugverkehr* steigt der Endenergiebedarf zunächst noch deutlich an, fällt jedoch bis 2045 wieder leicht ab. Dafür sind deutliche Effizienzsteigerungen notwendig. Die Szenarien unterscheiden sich an dieser Stelle im nationalen sowie im Kurzstreckenverkehr. Dort werden langfristig im Szenario *T45-Strom* batterieelektrische Flugzeuge, im Szenario *T45-H<sub>2</sub>* wasserstoffbetriebene Flugzeuge eingesetzt. Dadurch können im Vergleich zum Kerosin-Flugzeug Effizienzgewinne realisiert werden. Dennoch stellt der Luftverkehr in allen drei Szenarien 2045 knapp ein Drittel des gesamten Endenergiebedarfs und ist damit hinsichtlich der Energienachfrage einer der relevantesten Verkehrsträger.

Abbildung 5 stellt den Endenergiebedarf der Szenarien *T45-Strom*, *T45-H<sub>2</sub>* und *T45-PtG/PtL* gegliedert nach Energieträgern dar. Der deutliche Rückgang des Endenergiebedarfs in allen Szenarien geht mit einer Verschiebung der genutzten Endenergeträger einher.

Der Bedarf an *Benzin- und Dieselkraftstoffen inklusive Kerosin* umfasst heute über 95 % des Endenergiebedarfs im Verkehrssektor. Bis 2045 sinkt dieser Anteil im Szenario *T45-Strom* auf 48 %, im Szenario *T45-H<sub>2</sub>* auf 42 % und im Szenario *T45-PtG/PtL* auf 55 % ab. Die absolute Reduktion beträgt 562 TWh im Szenario *T45-Strom*, 568 TWh im Szenario *T45-H<sub>2</sub>* und 490 TWh im Szenario *T45-PtG/PtL*. Langfristig werden insbesondere treibhausgasneutrales Kerosin sowie Diesel für die Schifffahrt benötigt. Ihr Anteil an den Benzin- und Dieselkraftstoffen liegt 2045 in den Szenarien *T45-Strom* und *T45-H<sub>2</sub>* bei über 90 %. Im Szenario *T45-PtG/PtL*, das auch im Straßenverkehr verstärkt

auf synthetische Kraftstoffe setzt, beträgt der Anteil 73 %. Diese müssen, abhängig vom Szenario, als biogener oder synthetischer Kraftstoff zur Verfügung gestellt werden.

**Abbildung 5: Endenergiebedarf des Verkehrs nach Energieträgern in den Szenarien T45-Strom, T45-H<sub>2</sub> und T45-PtG/PtL**



Gas wird, aufgrund der Annahme, dass der Gaspreis zur zweiten Hälfte der Dekade bereits deutlich gesunken ist, insbesondere für schwere Nutzfahrzeuge aus Kostengründen in den Szenarien noch als Brückentechnologie eingesetzt. Daher steigt der Gasbedarf im Verkehrssektor bis 2030 im Szenario *T45-Strom* auf 45 TWh, in den beiden anderen Szenarien auf 59 TWh an. Während der Bedarf in den Szenarien *T45-Strom* und *T45-H<sub>2</sub>* bis 2045 auf unter 10 TWh zurückgeht, verbleiben im Szenario *T45-PtG/PtL* 75 TWh. Angesichts der aktuellen Entwicklung ist unklar, ob der den Berechnungen zugrundeliegende Preisfad für Gas erreichbar ist und ob potenzielle Nutzer:innen Gas als Brückentechnologie weiterhin nutzen möchten. Weiterhin ist offen, ob das entsprechende Fahrzeugangebot bereitgestellt wird. Es sei daher an dieser Stelle auf das Szenario *T45-RedGas* in Kapitel 5 verwiesen, das die Nutzung von Gas im Verkehrssektor deutlich reduziert.

*Strom* wird in allen Szenarien ein entscheidender Energieträger, weshalb die Förderung von batterieelektrischen Fahrzeugen eine robuste Strategie ist. Bis 2030 ist dieser Anstieg insbesondere von batterieelektrischen Pkw getrieben, aber auch Nutzfahrzeuge stellen in allen Szenarien bereits eine Nachfrage zwischen 15 und 21 TWh. Bis 2045 steigt der Strombedarf im Szenario *T45-Strom* auf 186 TWh. Die Szenarien *T45-H<sub>2</sub>* und *T45-PtG/PtL* haben mit 123 TWh bzw. 129 TWh einen etwas geringeren Strombedarf.

*Wasserstoff* kommt lediglich im Szenario *T45-H<sub>2</sub>* zum Einsatz. Für die Szenarien *T45-Strom* und *T45-PtG/PtL* wird davon ausgegangen, dass keine entsprechend ausgebaute Tankstellen-Infrastruktur zur Verfügung steht. Auch ohne diese Beschränkung ist Wasserstoff im Szenario *T45-Strom* gegenüber batterieelektrischen Alternativen nicht konkurrenzfähig und wird nur in kleinen Mengen eingesetzt (vgl. auch Szenario *TN-Strom* der ersten Modellierungsrunde). Im Szenario *T45-PtG/PtL* könnte Wasserstoff gerade im Langstreckeneinsatz und beim Transport von schweren Gütern aus wirtschaftlicher Perspektive teilweise synthetische Kraftstoffe ersetzen (vgl. Szenario *TN-PtG/PtL* der ersten Modellierungsrunde). Auch in diesem Szenario ist der Einsatz allerdings nur für einzelne Segmente wirtschaftlich attraktiv. Um eine möglichst hohe Bandbreite abzubilden, wurde daher auf

den Einsatz von Wasserstoff im Szenario *T45-PtG/PtL* verzichtet. Auch im Szenario *T45-H<sub>2</sub>* wird Wasserstoff in großen Mengen erst nach 2030 nachgefragt. Der Bedarf steigt bis 2045 dann deutlich auf 111 TWh an.

## 4.2 Verkehrs- und Fahrleistung

Für die Abschätzung der Entwicklung der Verkehrsnachfrage im Personen- und Güterverkehr in Deutschland bis 2045 wurden die in Kapitel 3.1 beschriebenen Energieträgerpreispfade sowie die in Kapitel 3.4 und 3.5 dargestellten Annahmen zu politischen Rahmenbedingungen in das ASTRA-M Modell implementiert. Es wurde für alle T45-Szenarien eine einheitliche Verkehrsnachfrage unterstellt, weil die wesentlichen politischen Rahmenbedingungen mit einer Wirkung auf die Verkehrsnachfrage für alle T45-Szenarien identisch sind. Die dargestellten Projektionen der Verkehrsleistungen für den Zeitraum bis 2045 basieren dabei auf dem Territorialprinzip. Damit sind alle auf deutschem Territorium gemachten Fahrten beinhaltet, auch wenn diese über die Ländergrenze hinaus zu einem Zielort führen.

Für die Entwicklung des Personenverkehrs sind vorrangig soziodemografische Treiber wie die Entwicklung des Einkommens der privaten Haushalte, die Entwicklung der Beschäftigung sowie die Entwicklung der Alterskohorten in der Bevölkerung maßgeblich. Darüber hinaus wird der Personenverkehr noch durch die Entwicklung der Fahrtkosten und Fahrtzeiten der verfügbaren Verkehrsmittel für bestimmte Quelle-Ziel-Verbindungen beeinflusst. Neben diesen Einflussfaktoren fließen kohortenspezifische Wegeraten abgeleitet aus "Mobilität in Deutschland 2017" (Nobis et al. 2018) mit in die Berechnung des Verkehrsaufkommens ein. Bisher ist man mit Ausnahmen von moderaten Annahmen zu einer zunehmenden Suffizienz davon ausgegangen, dass die zugrundeliegenden Wegeraten und damit das Mobilitätsverhalten pro Altersgruppe sich zukünftig nicht mehr wesentlich verändert. Die starken individuellen Einschränkungen während der COVID19-Pandemie haben jedoch dazu geführt, dass sich Änderungen im Verhalten auch unterstützt durch den Boost der Digitalisierung während der Pandemie auch nach der Pandemie verstetigen werden. Auswertungen von Umfragen (siehe Kapitel 3.5) lassen dies zumindest vermuten, weswegen diese Verstetigungseffekte mit in die Abschätzung der Verkehrsnachfrage eingeflossen sind.

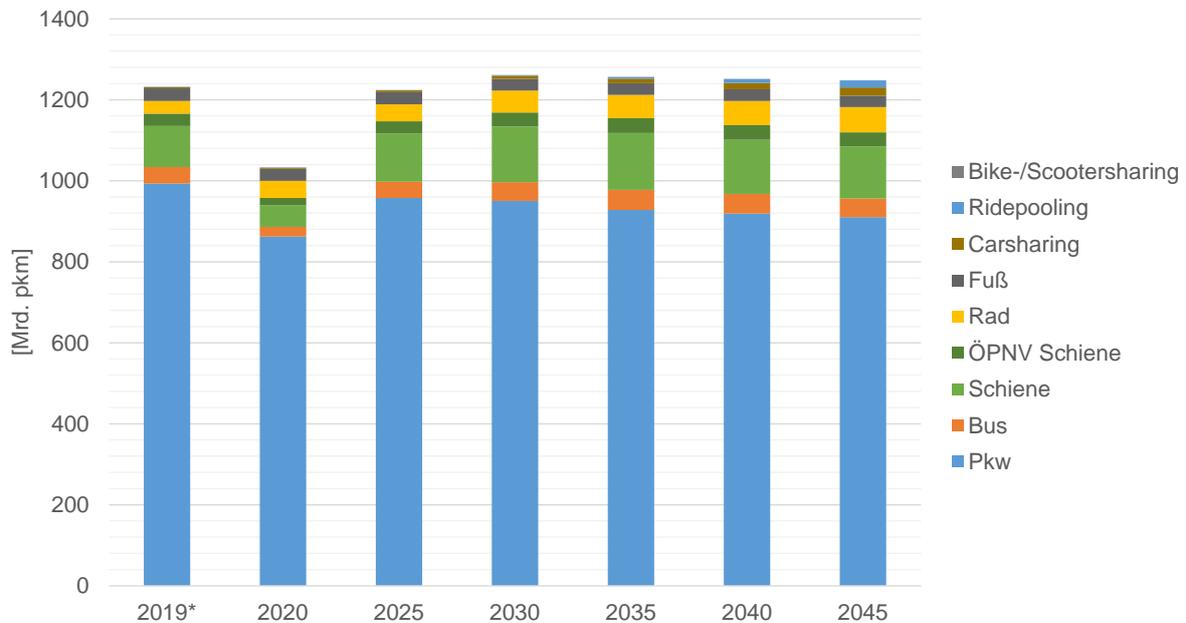
Da die Verkehrsleistung während der COVID19-Pandemie insbesondere durch die Lockdowns im Jahr 2020 signifikant geringer ausgefallen ist, als in den Jahren zuvor, wird bei der Darstellung der Entwicklung der Verkehrsnachfrage immer noch zusätzlich das Jahr 2019 hinzugefügt. Alle prozentualen und absoluten Änderungen bis 2030 und 2045 werden mit dem Jahr 2019 verglichen, um die Sondereffekte der Pandemie nicht zu stark in die Bewertung einfließen zu lassen.

Die Berechnungen mit ASTRA-M zur Entwicklung der Personenverkehrsleistung ergeben eine marginale Änderung bis 2045 in Höhe von 1,4 % gegenüber 2019. Bis 2030 steigt die Verkehrsleistung auf 1.260 Mrd. Personen-km (pkm) an und sinkt nach 2030 bis 2045 marginal auf 1.250 Mrd. pkm. Abbildung 6 zeigt die absolute Entwicklung der Verkehrsleistung im Personenverkehr pro Verkehrsmittel. Durch eine Erweiterung des ASTRA-M Modells im Personenverkehr um geteilte Verkehrsmittel wie Carsharing, Ridepooling sowie (e-)Bike/e-Scootersharing können diese nun von den bisher verwendeten Oberbegriffen Pkw und Rad differenziert werden. Zusätzlich unterscheidet das Personenverkehrsmodell in ASTRA-M nun auch den ÖPNV auf der Schiene vom Fernverkehr.

Durch die sich ändernden Rahmenbedingungen ergibt sich eine deutliche Änderung beim Modal Split bis 2045. Während die Verkehrsleistung im motorisierten Individualverkehr (Pkw) bis 2045 um 8,3 % bzw. 82,5 Mrd. pkm abnimmt, nehmen die Verkehrsleistungen aller anderen Verkehrsmittel mit Ausnahme des Fußverkehrs zum Teil deutlich zu. Der Schienenverkehr steigt bis 2045 gegenüber 2019 um 26,4 %, ÖPNV und Bus legen jeweils um 13 % zu. Besonders stark wirken sich die Verbesserungen der Infrastruktur in Kombination mit weiteren politischen Maßnahmen und der

Markthochlauf der Pedelecs und S-Pedelecs auf die Entwicklung des Radverkehrs aus. Die Modellsimulationen mit ASTRA-M ergeben hier eine Verdopplung der Verkehrsleistung des Radverkehrs bis 2045 auf dann 62,6 Mrd. pkm. Die deutliche Zunahme der Nutzung von neuen Mobilitätsformen wie Carsharing, Ridepooling sowie Bike- und Scootersharing auf 20,6 Mrd., 16,9 Mrd. bzw. 0,7 Mrd. pkm geht dabei jedoch zum Teil auf Kosten des Fußverkehrs, der bis 2045 um 10,8 % gegenüber 2019 zurückgeht.

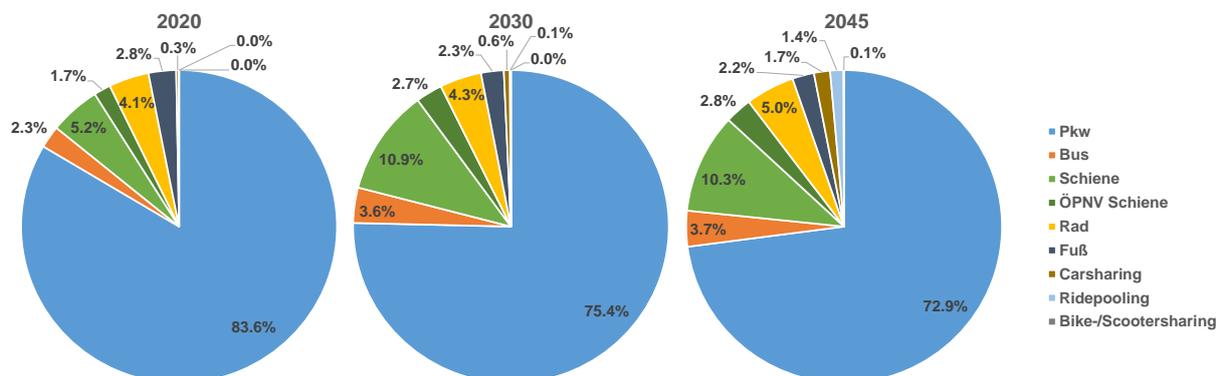
**Abbildung 6: Personenverkehrsleistung in Mrd. Personen-km nach Verkehrsmitteln**



Quelle: Fraunhofer ISI (eigene Berechnungen auf Basis von ASTRA-M)

Die Anteile der Verkehrsmittel am Modal Split (siehe Abbildung 7) verändern sich entsprechend deutlich, wobei der MIV trotzdem das dominierende Verkehrsmittel auf Grund seiner Flexibilität und der nach wie vor hohen Motorisierung bleibt. Der Anteil des MIV sinkt anhand der Abschätzung in den T45-Szenarien bis 2045 von knapp 81 % auf 73 %. Ein stärkerer Rückgang des MIV-Anteils ist jedoch auch dem Markthochlauf der Elektromobilität geschuldet, weil die operativen Kosten der Nutzung eines BEV deutlich unter der eines vergleichbaren Pkw mit Verbrennungsmotor liegen. Da die Entscheidung der Verkehrsmittelwahl auf Basis der sogenannten wahrgenommenen Kosten und damit im Falle des Pkw nur der operativen und nicht der Vollkosten fußt, entstehen Reboundeffekte, die den MIV langfristig gesehen wieder attraktiver werden lassen.

Der Anteil der Schiene verdoppelt sich bis 2045 nahezu. Auch der Anteil des schienengebundenen ÖPNV sowie des Busverkehrs nimmt spürbar zu. Trotz deutlicher Steigerung der Verkehrsleistung geteilter Mobilitätsformen, erreichen Carsharing, Ridepooling und Bike-/Scootersharing in Summe nur etwas mehr als 3 % bis 2045. Unter der Annahme eines schnelleren Markthochlaufs vollautomatisierter oder fahrerloser Mobilitätsdienste (Stufe 4 oder Stufe 5) kann dieser Anteil jedoch auch höher ausfallen.

**Abbildung 7: Modal Split im Personenverkehr (in % der Verkehrsleistung)**

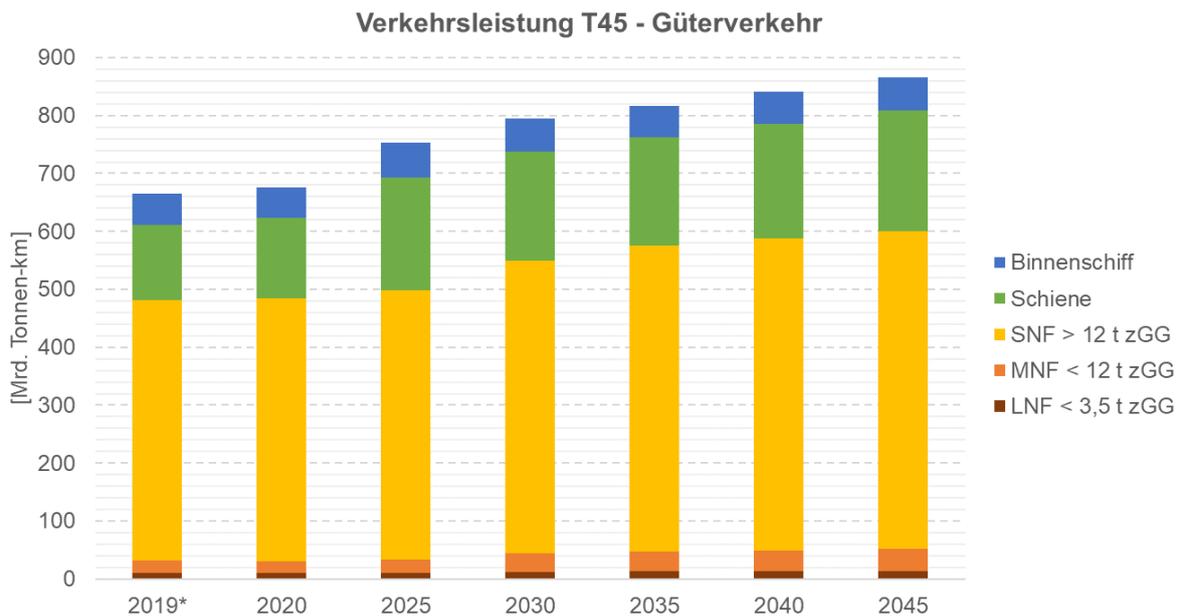
Quelle: Fraunhofer ISI, (eigene Berechnungen mit ASTRA-M)

Abbildung 8 zeigt die Veränderung der Güterverkehrsleistung in Mrd. Tonnen-km (kurz: tkm) pro Verkehrsmittel bis ins Jahr 2045. Die Veränderung der Verkehrsleistung im Güterverkehr basiert auf der wirtschaftlichen Entwicklung in Form der sektoralen Produktion, der Entwicklung der Fahrkosten und der Fahrzeiten. Fahrkosten und -zeiten werden in den T45-Szenarien durch die technologischen, energie-, infrastruktur- und verkehrspolitischen Annahmen (siehe Kapitel 3.1 bis Kapitel 3.5) beeinflusst.

Die genannten Faktoren führen zu einer Zunahme der gesamten Verkehrsleistung des Güterverkehrs auf deutschem Territorium um ca. 30 % bis 2045 gegenüber dem Vor-Corona Jahr 2019 (jährliches Wachstum von 0,7 %). Dies entspricht einem Wachstum der Verkehrsleistung von 201 Mrd. tkm bis 2045. Durch die angenommenen Investitionen in Ausbau und Digitalisierung der Schiene sowie die Anreize zur Nutzung der Schiene und des Kombinierten Verkehrs ergibt sich eine Steigerung der Verkehrsleistung auf der Schiene um 62 % bis 2045 ggü. 2019. Die Verkehrsleistung der Binnenschifffahrt steigt dagegen nur noch marginal bis 2045 um ca. 5 % ggü. 2019. Dies ist bedingt durch den strukturellen Effekt zurückgehender Transporte fossiler Energieträger wie beispielsweise der Kohle bis 2045, welche aktuell als Schüttgüter einen hohen Anteil am Güterverkehrsaufkommen der Binnenschifffahrt haben.

Bei der Entwicklung der Verkehrsleistung im Straßengüterverkehr lassen sich zwei Effekte beobachten. Trotz der Anreize zur Verlagerung auf Schiene und das Binnenschiff wächst die Verkehrsleistung bis 2030 um 14 % bzw. bis 2045 um 24 % ggü. 2019. Hier lässt sich ein ähnlicher Effekt wie im Personenverkehr beobachten. Die zunehmende Elektrifizierung der Lkw-Flotten in den T45-Szenarien führt zu einem Rückgang der Energie- bzw. Kraftstoffkosten. Dieser wirkt den Verlagerungswirkungen auf Schiene und Binnenschiff entgegen. In absoluten Zahlen bedeutet dies einen Anstieg der Verkehrsleistung auf der Straße um 118 Mrd. tkm bis 2045. Da der Markthochlauf der Elektrifizierung der Lkw-Flotten in den Gewichtsklassen unterhalb 12 Tonnen zulässigem Gesamtgewicht (zGG) und damit vorrangig im regionalen Verteilerverkehr schneller passiert, wächst unter anderem auch durch die Einführung der CO<sub>2</sub>-basierten Lkw-Maut die Verkehrsleistung der kleineren Lkw mit 66 % schneller als der schweren Lkw (+22 % bis 2045 ggü. 2019). Dieser Effekt wird durch die Erweiterung der Mautpflicht ab Juli 2024 für Fahrzeuge ab 3,5 Tonnen zulässiges Gesamtgewicht nur marginal ausgebremst, da die Anteile von bemauneten Autobahnfahrten im regionalen Verteilerverkehr auf Grund der begrenzten Distanzen nicht so stark ins Gewicht fallen.

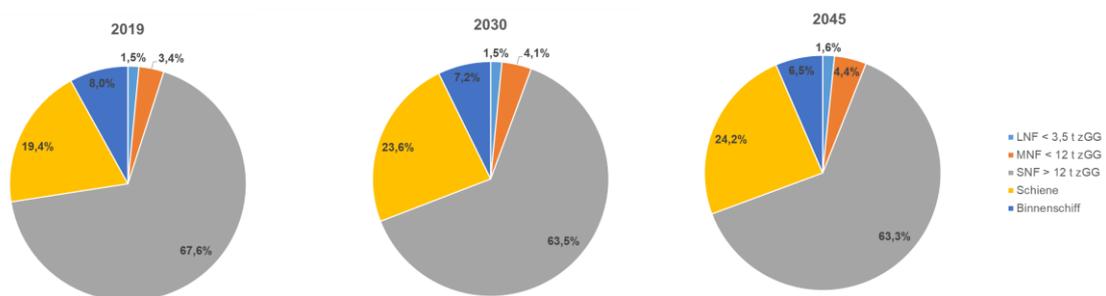
**Abbildung 8: Güterverkehrsleistung in Mrd. Tonnen-km nach Verkehrsmitteln**



Quelle: Fraunhofer ISI, (eigene Berechnungen mit ASTRA-M)

Abbildung 9 zeigt die Entwicklung des Modal Split im Güterverkehr. Der deutliche Rückgang des Modal Split der schweren Nutzfahrzeuge (SNF > 12 t zGG) bis 2030 auf 63,5 % wird nach 2030 bis 2045 gebremst, weil dort die Elektrifizierung etwas später an Fahrt gewinnt als bei leichten Nutzfahrzeugen (LNF) und schweren Nutzfahrzeugen unterhalb 12 Tonnen zGG (SNF < 12 t zGG). Der Modal Anteil der Schiene steigt von 19 % auf 24 % bis 2045, der Anteil der Binnenschiffahrt sinkt von 8 % auf 6,5 % in 2045.

**Abbildung 9: Modal Split im Güterverkehr (in % der Verkehrsleistung)**



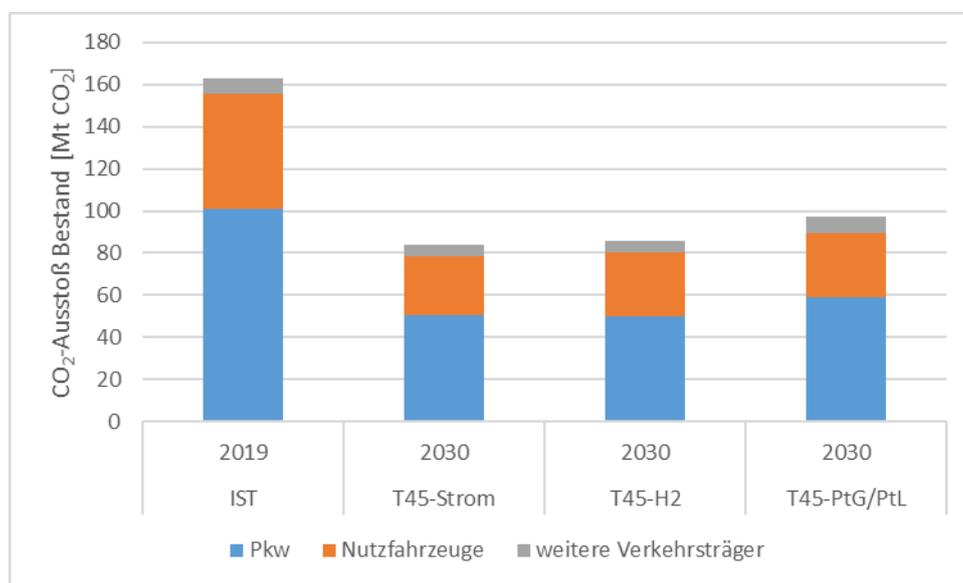
Quelle: Fraunhofer ISI, (eigene Berechnungen mit ASTRA-M)

### 4.3 CO<sub>2</sub>-Emissionen

Für den Verkehrssektor ist bis 2030 nach den Sektorzielen eine Reduktion der jährlichen Treibhausgasemissionen um 48 % gegenüber 1990 vorgesehen. Seit 1990 sind die Emissionen im Verkehrssektor weitestgehend konstant geblieben. Das bedeutet, dass die heutigen Emissionen in Höhe von 163 Mt CO<sub>2</sub> auf 85 Mt CO<sub>2</sub> reduziert werden müssen. Dieses Minderungsziel wird im Szenario *T45-Strom* mit 84 Mt CO<sub>2</sub> leicht übererfüllt, im Szenario *T45-H<sub>2</sub>* mit 85 Mt CO<sub>2</sub> genau erreicht und im Szenario *T45-PtG/PtL* ohne die Berücksichtigung von synthetischen Beimischungen mit 97 Mt CO<sub>2</sub>

deutlich verfehlt. Hier müssten synthetische Kraftstoffe in ausreichender Menge (ca. 50 TWh) zur Verfügung gestellt werden, um das Sektorziel von 85 Mt CO<sub>2</sub> zu erreichen.

**Abbildung 10: CO<sub>2</sub>-Ausstoß im Verkehr in den Szenarien T45-Strom, T45-H<sub>2</sub> und T45-PtG/PtL im Jahr 2030**

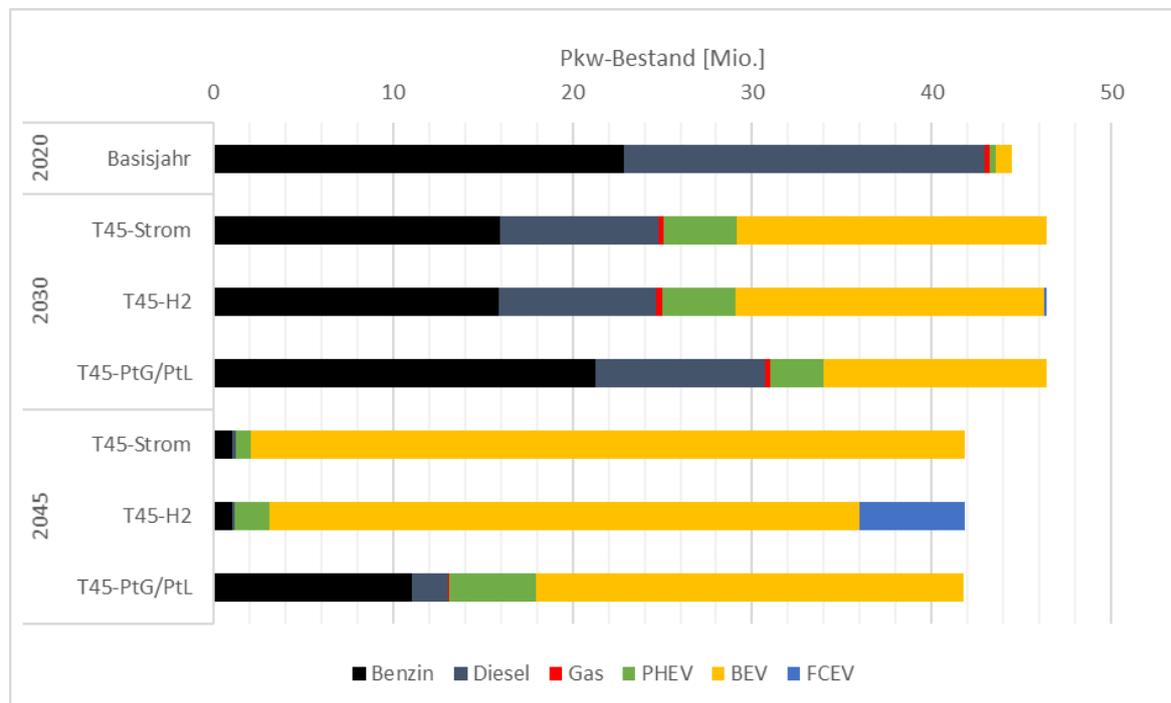


Auch 2045 werden im straßengebundenen Verkehr in den Szenarien *T45-Strom* und *T45-H<sub>2</sub>* kleine Restmengen an kohlenstoffhaltigen Energieträgern verwendet. Es handelt sich dabei um Restmengen von 4,5-5 Mt CO<sub>2</sub>, die nur vermieden werden können, falls im Jahr 2045 ein vollständiges Verbot für Verbrennungsfahrzeuge (im Fahrzeugbestand) erlassen wird. Da die Mengen kohlenstoffhaltiger Energieträger im straßengebundenen Verkehr jedoch gegenüber dem Flug- und Schiffsverkehr gering sind, wird davon ausgegangen, dass diese Mengen aus biogenen oder synthetischen Quellen bereitgestellt werden können oder über die Produktion von Kraftstoffen für den Luftverkehr abfallen.

## 4.4 Flottenentwicklung

### 4.4.1 Pkw

Abbildung 11 stellt den Pkw-Bestand 2030 und 2045 in den Szenarien *T45-Strom*, *T45-H<sub>2</sub>* und *T45-PtG/PtL* dar. Eine zeitlich detaillierter aufgelöste Darstellung findet sich online im Szenario Explorer der Langfristszenarien ([www.langfristszenarien.de](http://www.langfristszenarien.de)). Insgesamt geht der Pkw-Bestand in allen Szenarien langfristig - nach einem zwischenzeitlichen Anstieg - auf knapp 42 Millionen Fahrzeuge zurück.

**Abbildung 11: Pkw-Bestand in den Szenarien T45-Strom, T45-H<sub>2</sub> und T45-PtG/PtL in den Jahren 2030 und 2045**

In allen drei Szenarien spielen Elektrofahrzeuge bis 2030 eine entscheidende Rolle. In den Szenarien *T45-Strom* und *T45-H<sub>2</sub>* wächst ihr Bestand bis 2030 auf 21 Millionen Fahrzeuge an. Bei rund 17 Millionen Fahrzeugen handelt es sich dabei um rein batterieelektrische Fahrzeuge. Das Ziel der Bundesregierung, bis 2030 15 Millionen batterieelektrische Fahrzeuge auf die Straße zu bringen, wird damit in den Szenarien übererfüllt. Dies ist jedoch notwendig, um die für den Verkehrssektor definierten Reduktionsziele für den Ausstoß von Treibhausgasen zu erreichen. Im Szenario *T45-PtG/PtL* steigt der Bestand bis 2030 auf 15 Millionen batterieelektrische Fahrzeuge, davon 3 Millionen Plug-in Hybride, an. Die Beimischung synthetischer Kraftstoffe ermöglicht auch in diesem Szenario die Einhaltung der Treibhausgasziele. Während die Entwicklung der Szenarien *T45-Strom* und *T45-H<sub>2</sub>* bis 2030 noch nahezu identisch verläuft, findet bis 2045 eine Differenzierung statt. Im Szenario *T45-Strom* kommen langfristig nahezu ausschließlich batterieelektrische Pkw zum Einsatz. Ihr Anteil steigt bis 2045 auf 97 % - dies entspricht 41 Millionen Fahrzeugen - an. Davon sind weniger als eine Million Fahrzeuge Plug-in Hybride. Auch in den Szenarien *T45-H<sub>2</sub>* und *T45-PtG/PtL* sind batterieelektrische Fahrzeuge langfristig die dominierende Antriebsform. 2045 liegt ihr Anteil im Szenario *T45-H<sub>2</sub>* bei 83 %, im Szenario *T45-PtG/PtL* bei 69 %.

Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) spielen im Szenario *T45-H<sub>2</sub>* erst langfristig eine Rolle. Im Zeitraum bis 2030 sind die Fahrzeuge und der Kraftstoff auch im Szenario *T45-H<sub>2</sub>* zu teuer, um eine umfangreiche Marktdiffusion zu ermöglichen. Im Zeitraum bis 2045 eröffnen sich jedoch zwei Anwendungsfelder. Zum einen werden FCEV bei Fahrprofilen mit hohen Reichweitenanforderungen genutzt, bei denen ein rein batterieelektrischer Antrieb nicht ausreicht. Zum anderen werden FCEV auch bei niedrigen Fahrleistungen verwendet. FCEV konkurrieren an dieser Stelle mit Verbrennern und batterieelektrischen Fahrzeugen. Erstere sind im Szenario *T45-H<sub>2</sub>* in der Perspektive 2045 aufgrund von Sanktionen und Zahlungen für CO<sub>2</sub>-Emissionen vergleichsweise teuer. Batterieelektrische Fahrzeuge hingegen können bei vergleichsweise hohen Batteriekosten und geringer Fahrleistung ihren Effizienzvorteil nicht ausreichend nutzen, um wirtschaftlich zu sein. Der Anteil FCEV steigt daher bis 2045 auf 14 % des Fahrzeugbestandes an. In den Szenarien *T45-Strom* und *T45-PtG/PtL* wurde auf den Einsatz von FCEV verzichtet. Erste Modellberechnungen sowie die Ergebnisse der

ersten Modellierungsrunde zeigten, dass der Marktanteil zu gering wäre, um für die Hersteller sowie Infrastrukturbetreiber wirtschaftlich attraktiv zu sein und ein Fahrzeugangebot zur Verfügung zu stellen.

Diesel- und Benzinfahrzeuge werden in allen drei Szenarien kontinuierlich ersetzt. In den Szenarien *T45-Strom* und *T45-H<sub>2</sub>* verbleiben 2045 jeweils noch knapp über eine Million Fahrzeuge in der Flotte. Der Anteil liegt damit bei unter 3 % des Bestandes. Es handelt sich dabei primär um ältere Fahrzeuge mit sehr niedriger Fahrleistung. Bei geringer Fahrleistung lohnt sich ein Umstieg auf alternative Antriebe, aufgrund der höheren Investition, in der Regel erst spät. Aufgrund der Nutzungsdauer von durchschnittlich 14 Jahren verbleiben auch 2045 noch einzelne Fahrzeuge in der Flotte, auch wenn in den Szenarien *T45-Strom* und *T45-H<sub>2</sub>* die Neuzulassungen für Benzin- und Dieselfahrzeuge bereits 2030 unter 15 % der gesamten Neuzulassungen liegen. 2035 werden nahezu keine Verbrenner mehr neu zugelassen. Im Szenario *T45-PtG/PtL* sind hingegen, nach dem Auslaufen verschiedener Förderprogramme, zwei Drittel der neu zugelassenen Fahrzeuge wieder Benzin- oder Dieselfahrzeuge. Der Bestand 2045 bleibt entsprechend hoch bei rund 13 Millionen Fahrzeugen. Dies entspricht knapp einem Drittel des Fahrzeugbestandes. Gasfahrzeuge spielen für Pkw in keinem der Szenarien eine relevante Rolle.

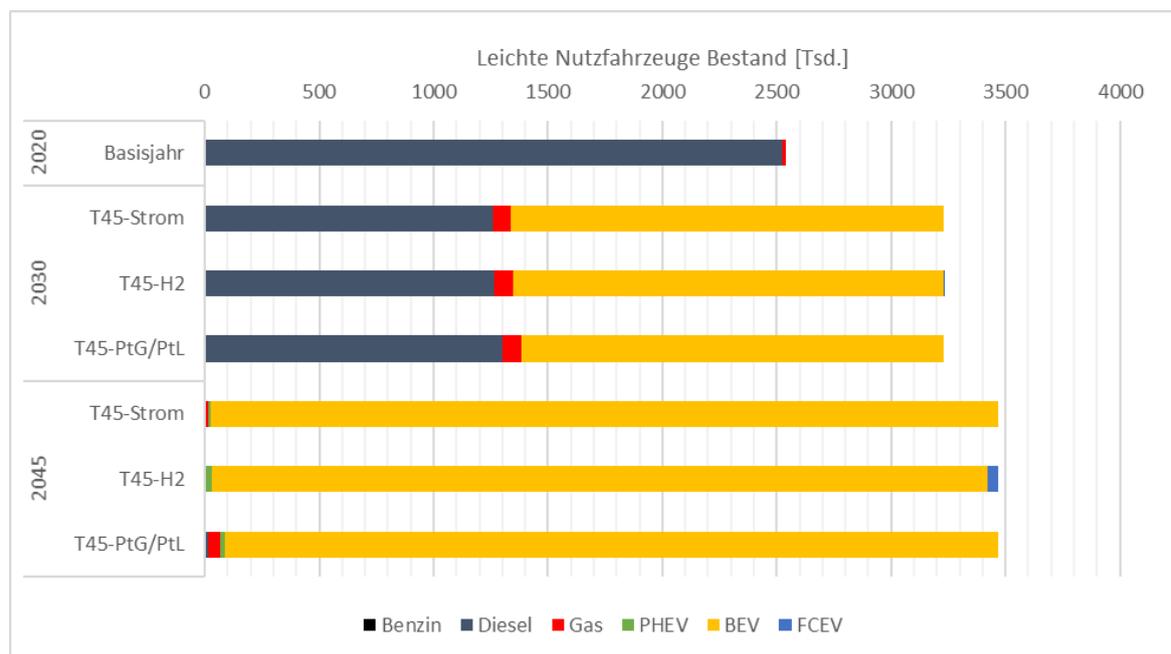
## 4.4.2 Nutzfahrzeuge

Nutzfahrzeuge werden an dieser Stelle in drei Größenklassen betrachtet:

- leichte Nutzfahrzeuge (<3,5 t zGG),
- mittlere Nutzfahrzeuge (3,5-12 t zGG) und
- schwere Nutzfahrzeuge (>12 t zGG).

Im Folgenden werden jeweils die Zeitpunkte 2030 und 2045 betrachtet. Eine zeitliche höhere aufgelöste Darstellung findet sich im Szenario Explorer der Langfristszenarien ([www.langfristszenarien.de](http://www.langfristszenarien.de))

Abbildung 12 zeigt den Bestand leichter Nutzfahrzeuge in den Szenarien *T45-Strom*, *T45-H<sub>2</sub>* und *T45-PtG/PtL*. Wie bereits in den Szenarien *TN-Strom*, *TN-H<sub>2</sub>* und *TN-PtG/PtL* erfolgt in allen Szenarien bis 2045 die nahezu vollständige Umstellung auf batterieelektrische Antriebe. Um jedoch die Einhaltung des Sektorziels im Verkehr zu ermöglichen, ist eine deutliche Beschleunigung der Flottenumstellung notwendig. So steigt der Anteil der batterieelektrischen leichten Nutzfahrzeuge im Bestand in allen Szenarien bereits bis 2030 auf knapp 60 %. Da die Elektrifizierung primär bei Kurzstreckenfahrzeugen beginnt, liegt der elektrische Fahranteil mit ca. 55 % knapp darunter. Dies bedeutet auch, dass 2030 über 90 % der neu zugelassenen leichten Nutzfahrzeuge mit batterieelektrischem Antrieb ausgestattet sind. Um dies zu erreichen, sind umfangreiche flankierende (Politik-) Maßnahmen notwendig.

**Abbildung 12: Bestand leichter Nutzfahrzeuge in den Szenarien T45-Strom, T45-H<sub>2</sub> und T45-PtG/PtL in den Jahren 2030 und 2045**

Der Bestand mittlerer Nutzfahrzeuge ist ebenfalls von batterieelektrischen Fahrzeugen geprägt. Abbildung 13 stellt die entsprechende Entwicklung dar. Im Jahr 2030 liegt der Anteil batterieelektrischer Fahrzeuge in allen Szenarien bei knapp über 35 %. Circa ein Drittel der Fahrleistung wird elektrisch erbracht. Bis 2045 steigt der Anteil der batterieelektrischen Fahrzeuge am Bestand im Szenario *T45-Strom* auf 96 %. In den anderen Szenarien liegt er mit 80 % (*T45-H<sub>2</sub>*) beziehungsweise 83 % (*T45-PtG/PtL*) etwas darunter.

Brennstoffzellenfahrzeuge stehen, gemäß den angenommenen Rahmenparametern, nur im Szenario *T45-H<sub>2</sub>* zur Verfügung. In der Perspektive 2030 werden die Fahrzeuge bei hohen Fahrleistungen, außerhalb der Reichweite eines batterieelektrischen Fahrzeuges, eingesetzt. Ihr Anteil am Bestand liegt 2030 bei 3 %. Bis 2045 steigt der Anteil auf 18 % an. Die Brennstoffzellenfahrzeuge werden dann auch für Fahrprofile mit geringer Jahresfahrleistung eingesetzt, für die der Umstieg auf einen batterieelektrischen Antrieb nicht wirtschaftlich ist. Die geringeren laufenden Kosten des batterieelektrischen Antriebs können in diesem Fall die höhere Investition nicht kompensieren<sup>6</sup>.

Gasfahrzeuge kommen insbesondere in der zweiten Hälfte des aktuellen Jahrzehnts zum Einsatz. Ihr Anteil am Bestand liegt 2030, je nach Szenario, bei sieben bis neun Prozent. Sie profitieren vom angenommenen Absinken des Gaspreises auf Vorkriegsniveau. Zum jetzigen Zeitpunkt ist jedoch unklar, ob der Einsatz von Gasfahrzeugen mittelfristig tatsächlich eine Rolle spielen wird. Ein relevanter Faktor ist, neben der Preisentwicklung, auch das Vertrauen der Fahrzeugnutzer:innen in die Preisstabilität und Versorgungssicherheit. Die Fahrzeuge werden, ähnlich zu Brennstoffzellenfahrzeugen im Szenario *T45-H<sub>2</sub>*, als Fahrzeuge mit hoher Reichweite und später auch als günstige Alternative für Fahrzeuge mit geringer Fahrleistung eingesetzt. Ihr Anteil am Bestand liegt 2045 im Szenario *T45-PtG/PtL* bei 16 %. In den Szenarien *T45-Strom* und *T45-H<sub>2</sub>*, in denen für Fahrprofile mit geringer Fahrleistung kostengünstigere Alternativen zur Verfügung stehen, liegt der Anteil bei 3 % und 2 %. Wie bereits erläutert, ist es jedoch durchaus vorstellbar, dass statt Gas Dieselmotoren verwendet werden und die Zwischenlösung Gas entfällt.

<sup>6</sup> Fahrzeuge mit kleinerer, auf den individuellen Anwendungsfall abgestimmter Batterie wären wirtschaftlich attraktiv, sind jedoch bislang im Modell nicht abgebildet. An dieser Stelle ist unklar, inwiefern zukünftig eine Differenzierung der Batteriegrößen stattfindet, was eine verstärkte Elektrifizierung der Flotte begünstigen könnte.

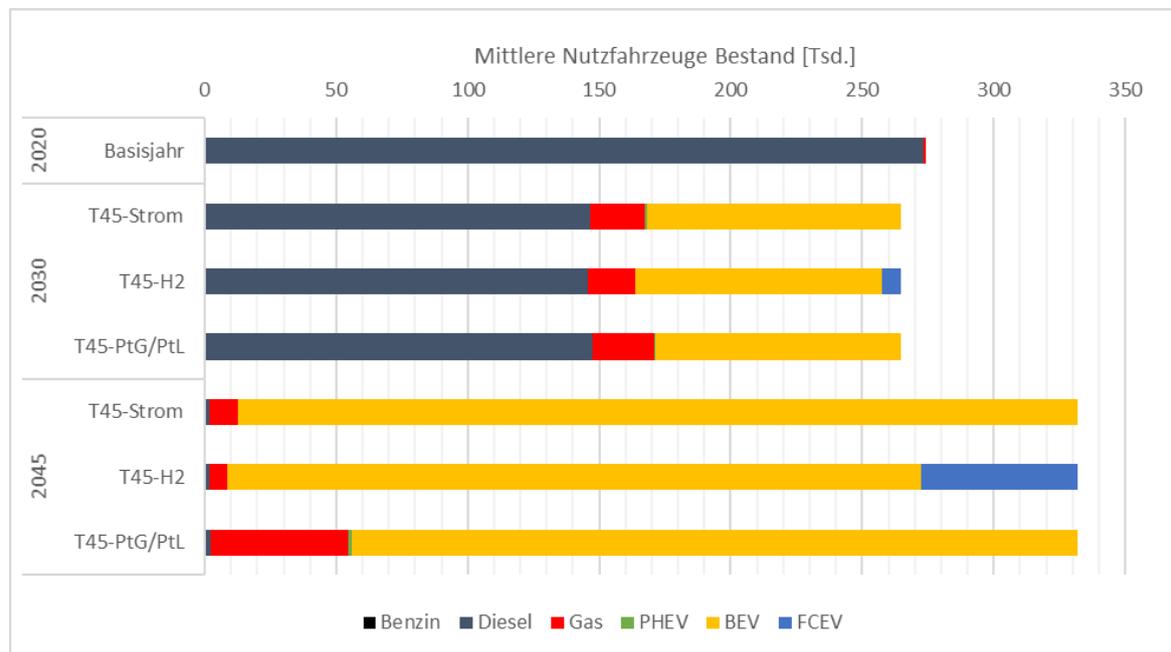
**Abbildung 13: Bestand mittlerer Nutzfahrzeuge in den Szenarien T45-Strom, T45-H<sub>2</sub> und T45-PtG/PtL in den Jahren 2030 und 2045**

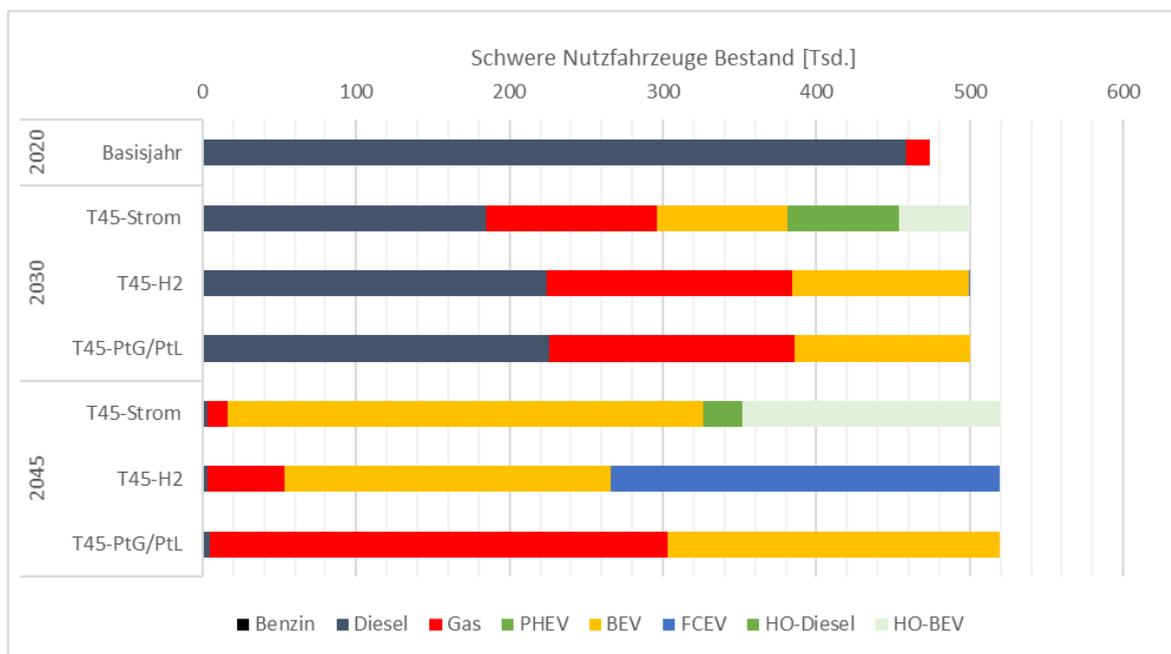
Abbildung 14 stellt den Bestand schwerer Nutzfahrzeuge in den Szenarien *T45-Strom*, *T45-H<sub>2</sub>* und *T45-PtG/PtL* für die Jahre 2030 und 2045 dar. Dabei sind elektrische Antriebskonzepte in allen drei Szenarien relevant. Aufgrund der angenommenen umfangreichen Förderung der Fahrzeuge können diese bereits vor 2030 ihren Effizienzvorteil nutzen. Dadurch wird in den Szenarien *T45-H<sub>2</sub>* und *T45-PtG/PtL* bis 2030 knapp ein Viertel der Flotte elektrifiziert. Im Szenario *T45-Strom* liegt der Anteil - unter Berücksichtigung von schnellladefähigen elektrischen Nutzfahrzeugen (BEV), Oberleitungs-Diesel-Fahrzeugen (HO-Diesel) und Oberleitungsfahrzeugen mit Batterie (HO-BEV) - bei 41 %. Die zusätzliche Elektrifizierung wird durch den angenommenen Aufbau von Oberleitungs- und Schnellladeinfrastruktur erreicht, der in den anderen beiden Szenarien nicht stattfindet. Der Anteil der vollelektrischen Fahrzeuge an den Neuzulassungen liegt 2030 in den Szenarien *T45-H<sub>2</sub>* und *T45-PtG/PtL* bei 40 %. Im Szenario *T45-Strom* werden 54 % erreicht. Zusätzlich handelt es sich bei 22 % der Neuzulassungen um HO-Diesel. Limitierender Faktor ist in allen Szenarien das zu diesem Zeitpunkt noch leicht eingeschränkte Angebot der Hersteller sowie die eingeschränkte Reichweite der Fahrzeuge. Dies erklärt auch, warum der elektrische Fahranteil geringer ist als der Anteil der batterieelektrischen Fahrzeuge am Bestand. Er liegt im Szenario *T45-Strom* bei 20 %, in den Szenarien *T45-H<sub>2</sub>* und *T45-PtG/PtL* bei 11 %. Das Ziel der Bundesregierung, bis 2030 circa ein Drittel der Fahrleistung zu elektrifizieren, wird im Szenario *T45-Strom* im Jahr 2032 erreicht. 2045 ist die Bestandsflotte im Szenario *T45-Strom* nahezu vollständig elektrifiziert. HO-Diesel spielen mit einem Anteil von 5 % am Bestand eine untergeordnete Rolle. Sie werden als Brückentechnologie genutzt, um bereits früh hohe Reichweiten zu ermöglichen. Langfristig dominieren jedoch rein elektrische Antriebe. BEV und HO-BEV weisen im Langstreckeneinsatz ähnlich Gesamtkosten auf. Das exakte Verhältnis ist jedoch von der Fahrzeugkonfiguration, der verfügbaren Infrastruktur sowie der erforderlichen Reichweite abhängig. Beide Technologien können sich hier gegenseitig ersetzen. In den Szenarien *T45-H<sub>2</sub>* und *T45-PtG/PtL* steigt der Anteil batterieelektrischer Fahrzeuge bis 2045 auf 42 %. Dabei handelt es sich um den Teil der Flotte, der ohne öffentliches Nachladen batterieelektrisch betrieben werden kann. Es zeigt sich, dass auch bei schweren Nutzfahrzeugen der batterieelektrische Antrieb in der Regel die kosteneffizienteste Alternative darstellt. Es sei an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen, dass der Infrastrukturausbau an dieser Stelle hinter den Vorgaben

des aktuellen Kommissionsvorschlags zur „Alternative Fuel Infrastructure Regulation“ (European Commission 2021b) zurückbleibt. Dieser sieht ein initiales Netz für Nutzfahrzeuge im Jahr 2030 vor.

Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) stehen, gemäß den getroffenen Annahmen, nur im Szenario *T45-H<sub>2</sub>* zur Verfügung. Aufgrund der initial hohen Wasserstoffpreise werden FCEV, trotz angenommener Förderung der Investition, erst ab 2030 in großen Stückzahlen eingesetzt. Bis 2045 wird knapp die Hälfte der Flotte auf FCEV umgestellt. Es handelt sich dabei um Fahrzeuge mit hoher Fahrleistung, deren Einsatzprofil ohne öffentliche Ladeinfrastruktur keine direkte Elektrifizierung zulässt.

Gasfahrzeuge kommen, wie schon im Kontext der mittleren Nutzfahrzeuge beschrieben, insbesondere ab der zweiten Hälfte des aktuellen Jahrzehnts zum Einsatz. Aufgrund der bei wieder fallenden Gaspreisen leicht niedrigeren operativen Kosten im Vergleich zum Diesel wird das Gasfahrzeug zur Rückfalloption bei Fahrprofilen, bei denen eine Elektrifizierung zum jeweiligen Zeitpunkt der Anschaffung noch nicht möglich ist. So steigt der Anteil am Bestand bis 2030 in den Szenarien *T45-H<sub>2</sub>* und *T45-PtG/PtL* auf ein Drittel der Flotte an. Im Szenario *T45-Strom* ist der Anteil mit 22 % hingegen geringer, da aufgrund der vorhandenen Infrastruktur die elektrifizierten Antriebsalternativen höhere Reichweiten zurücklegen können. Bis 2045 geht der Anteil in den Szenarien *T45-Strom* und *T45-H<sub>2</sub>* auf 3 % beziehungsweise 10 % zurück. Im Szenario *T45-PtG/PtL* ist Gas hingegen, neben dem operativ teureren Dieselantrieb, die verbleibende Option auf der Langstrecke. Daher liegt der Anteil der Gasfahrzeuge am Bestand 2045 bei 57 %. Wie bereits erläutert, ist es jedoch durchaus vorstellbar, dass statt Gas Dieselmotoren verwendet werden, da Nutzer die Versorgungssicherheit als klares Hemmnis gegen Gasfahrzeuge wahrnehmen.

**Abbildung 14: Bestand schwerer Nutzfahrzeuge in den Szenarien *T45-Strom*, *T45-H<sub>2</sub>* und *T45-PtG/PtL* in den Jahren 2030 und 2045**



## 4.5 Endenergiebedarf nach Verkehrsträgern

### 4.5.1 Pkw

Der Endenergiebedarf für Pkw sinkt bis 2045 auf 102 TWh (*T45-Strom*), 115 TWh (*T45-H<sub>2</sub>*) beziehungsweise 138 TWh (*T45-PtG/PtL*) ab. Dies entspricht einer Reduktion gegenüber dem Basisjahr von bis zu 74 %. Die Unterschiede im Endenergiebedarf sind auf die unterschiedliche Effizienz der

Antriebe zurückzuführen. Dabei ermöglicht der effiziente Elektromotor höhere Reduktionen als die Brennstoffzelle oder der Verbrennungsmotor. Abbildung 15 stellt den Endenergiebedarf für Pkw 2030 und 2045 dar. Eine zeitlich höher aufgelöste Darstellung findet sich im Szenario Explorer der Langfristszenarien ([www.langfristszenarien.de](http://www.langfristszenarien.de)).

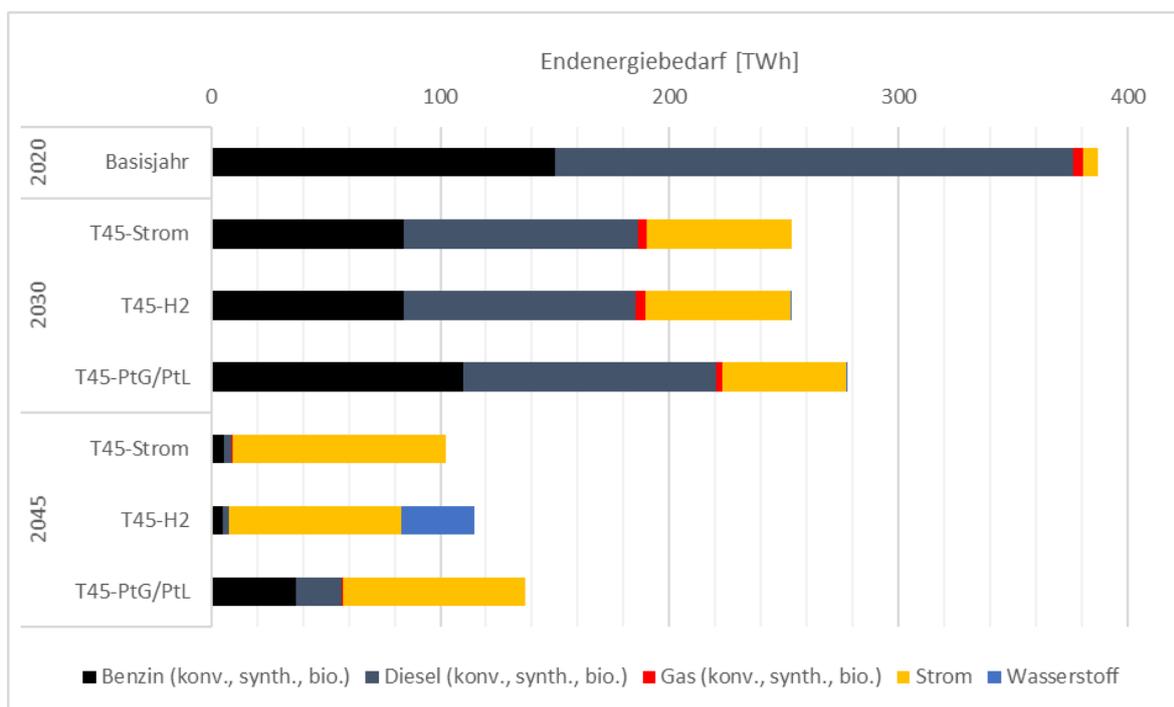
Bis 2030 steigt der elektrische Endenergiebedarf für Pkw in den Szenarien *T45-Strom* und *T45-H<sub>2</sub>* auf 63 TWh an. Das Szenario *T45-PtG/PtL* bleibt leicht dahinter zurück und benötigt 54 TWh. 2045 benötigt das Szenario *T45-Strom* 93 TWh elektrische Energie. Der Bedarf in den beiden anderen Szenarien liegt mit 80 TWh (*T45-PtG/PtL*) und 75 TWh (*T45-H<sub>2</sub>*) niedriger.

Wasserstoff wird nur im Szenario *T45-H<sub>2</sub>*, in großer Menge erst nach 2030, eingesetzt. Der Bedarf steigt bis 2045 auf 32 TWh.

Der Bedarf an Benzin- und Dieselmotoren wird in den Szenarien *T45-Strom* und *T45-H<sub>2</sub>* bis 2030 halbiert. Er liegt 2030 bei 186 TWh. Im Szenario *T45-PtG/PtL* werden hingegen noch 220 TWh benötigt. Bis 2045 sinkt der Bedarf in den Szenarien *T45-Strom* und *T45-H<sub>2</sub>* auf unter 10 TWh. Dies entspricht rund 2 % des Ausgangsniveaus. Im Szenario *T45-PtG/PtL* werden weiterhin 57 TWh, dann primär aus synthetischen Quellen, eingesetzt.

Gas spielt für den Pkw-Bereich mittel- oder auch kurzfristig keine Rolle mehr.

**Abbildung 15: Endenergiebedarf Pkw in den Szenarien *T45-Strom*, *T45-H<sub>2</sub>* und *T45-PtG/PtL* in den Jahren 2030 und 2045<sup>7</sup>**



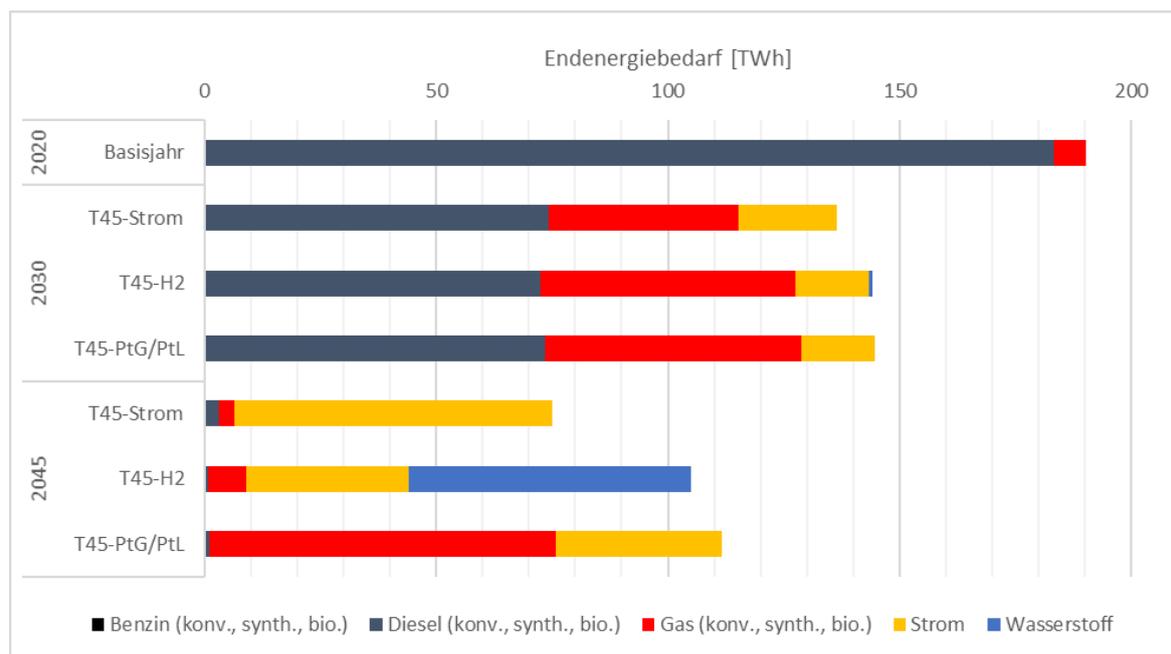
## 4.5.2 Nutzfahrzeuge

Abbildung 16 stellt den Endenergiebedarf für die gesamte Nutzfahrzeugflotte 2030 und 2045 dar. Eine zeitlich höher aufgelöste Darstellung findet sich wiederum im Szenario Explorer der Langfrist-

<sup>7</sup> Das Modell ALADIN stellt die Fahrzeugflotte und deren Energiebedarf als kontinuierliche Entwicklung dar. Auf die Modellierung einmaliger Sondereffekte, wie der massiv reduzierten Fahrleistung während der Covid19-Pandemie wird bewusst verzichtet. Das modellierte Basisjahr 2020 stellt somit eine valide Bezugsgröße dar, die sich in den Trend der Jahre 2019 und 2021 eingliedert.

szenarien ([www.langfristszenarien.de](http://www.langfristszenarien.de)). Die Abbildungen 17, 18 und 19 stellen den Endenergiebedarf für Nutzfahrzeuge in den einzelnen Größenklassen dar. Analog zum Endenergiebedarf für Pkw, geht auch der Endenergiebedarf für Nutzfahrzeuge zurück. Die stärkste Reduktion wird im Szenario *T45-Strom* erreicht. Sie beträgt bis 2045 60 %. Dies entspricht einer Reduktion von 190 TWh auf 75 TWh. Die Reduktion in den Szenarien *T45-H<sub>2</sub>* und *T45-PtG/PtL* beträgt im gleichen Zeitraum 45 % bzw. 41 %.

**Abbildung 16: Endenergiebedarf Nutzfahrzeuge in den Szenarien *T45-Strom*, *T45-H<sub>2</sub>* und *T45-PtG/PtL* in den Jahren 2030 und 2045<sup>8</sup>**



Der Strombedarf steigt in den Szenarien *T45-H<sub>2</sub>* und *T45-PtG/PtL* auf 16 TWh an. Wie bereits erläutert, verlaufen beide Szenarien, aufgrund der für elektrische Antriebe günstigen Rahmenbedingungen zunächst nahezu identisch. Die Stromnachfrage im Szenario *T45-Strom* ist nochmals höher und liegt bei 21 TWh. Dabei werden 9 TWh für leichte, 2 TWh für mittlere und 10 TWh für schwere Nutzfahrzeuge benötigt. Bis 2045 steigt der Strombedarf im Szenario *T45-Strom* auf 69 TWh an. Die schweren Nutzfahrzeuge gewinnen dabei an Bedeutung und sind für über 60 % des Strombedarfs (43 TWh) verantwortlich. In den Szenarien *T45-H<sub>2</sub>* und *T45-PtG/PtL* ist der Strombedarf 2045 mit jeweils rund 35 TWh halb so groß wie im Szenario *T45-Strom*. Während sich die Szenarien bei leichten und mittleren Nutzfahrzeugen stark ähneln, treten bei schweren Nutzfahrzeugen deutliche Verschiebungen auf. In diesem Segment liegt der Strombedarf in den Szenarien *T45-H<sub>2</sub>* und *T45-PtG/PtL* bei unter einem Drittel des Strombedarfs des Szenarios *T45-Strom*. Dies ist darauf zurückzuführen, dass, aufgrund mangelnder Infrastruktur batterieelektrische Antriebe bei hohen Fahrleistungen nicht eingesetzt werden können.

Wasserstoff wird nur im Szenario *T45-H<sub>2</sub>* nach 2030 eingesetzt. Bis 2045 steigt der Bedarf auf 61 TWh an. Davon entfallen 57 TWh auf schwere, 3 TWh auf mittlere und 1 TWh auf leichte Nutzfahrzeuge. Wasserstoff kommt insbesondere dann zum Einsatz, wenn die direkte Elektrifizierung aufgrund fehlender Infrastruktur nicht möglich ist.

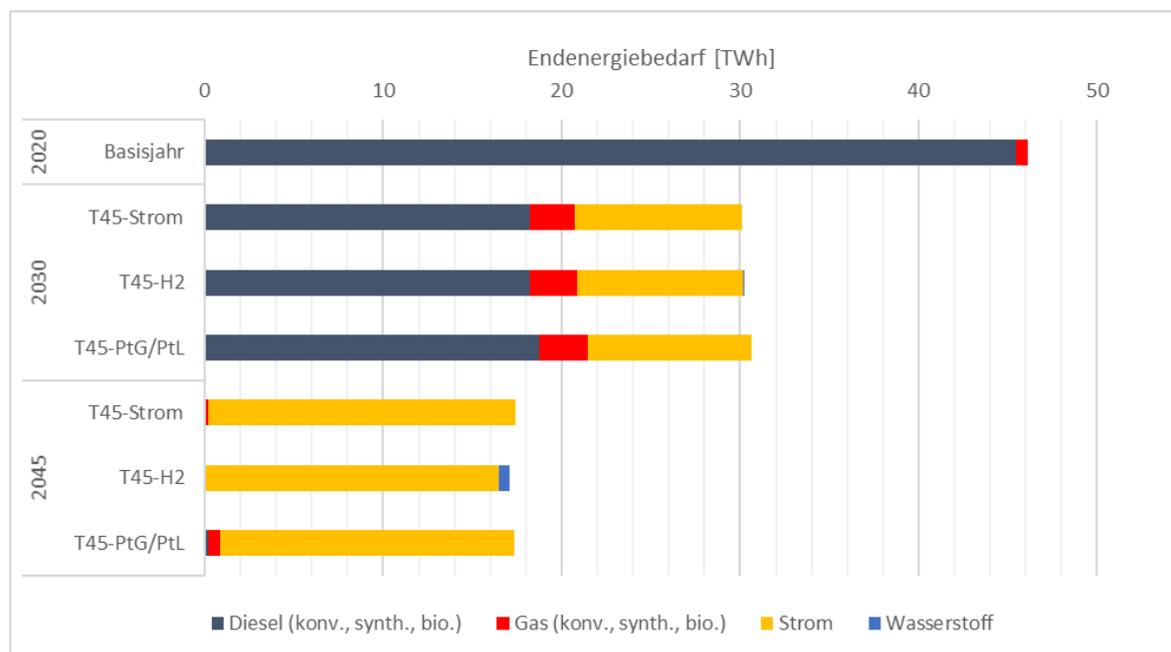
<sup>8</sup> Das Modell ALADIN stellt die Fahrzeugflotte und deren Energiebedarf als kontinuierliche Entwicklung dar. Auf die Modellierung einmaliger Sondereffekte, wie der massiv reduzierten Fahrleistung während der Covid19-Pandemie wird bewusst verzichtet. Das modellierte Basisjahr 2020 stellt somit eine valide Bezugsgröße dar, die sich in den Trend der Jahre 2019 und 2021 eingliedert.

Wie bereits in Kapitel 4.4.2 beschrieben, wird für Nutzfahrzeuge mittelfristig Gas in begrenztem Umfang als Dieselalternative eingesetzt. Während der Bedarf in den Szenarien *T45-H<sub>2</sub>* und *T45-PtG/PtL* bis 2030 nahezu identisch auf 55 TWh ansteigt, liegt der Bedarf im Szenario *T45-Strom* mit 41 TWh deutlich niedriger. Bis 2045 fällt der Bedarf in den Szenarien *T45-H<sub>2</sub>* und *T45-Strom* auf 8 TWh beziehungsweise 3 TWh ab. Im Szenario *T45-PtG/PtL* steigt der Bedarf hingegen auf 75 TWh an. Über 90 % dieses Bedarfs sind auf schwere Nutzfahrzeuge zurückzuführen. Der Bedarf muss dann vollständig aus synthetischen und biogenen Quellen gedeckt werden. Wie beschrieben, handelt es sich hierbei um ein kostengetriebenes Ergebnis, das stark vom angenommenen Gaspreis abhängig ist. Es ist heute zumindest unklar, ob dieser Anstieg tatsächlich erfolgen wird. Zur Einhaltung des Sektorziels im Verkehr ist die Brückentechnologie Gas nicht notwendig, wie das Szenario *T45-RedEff* zeigt.

Der Dieselbedarf wird in allen Szenarien bis 2030 auf rund 40 % des Ausgangsniveaus reduziert. Allerdings werden, wie bereits beschrieben, große Teile durch Gas als Brückentechnologie ersetzt. 2045 spielt Diesel keine relevante Rolle mehr. Im Szenario *T45-Strom* verbleiben 3 TWh, in den anderen beiden Szenarien weniger als 1 TWh.

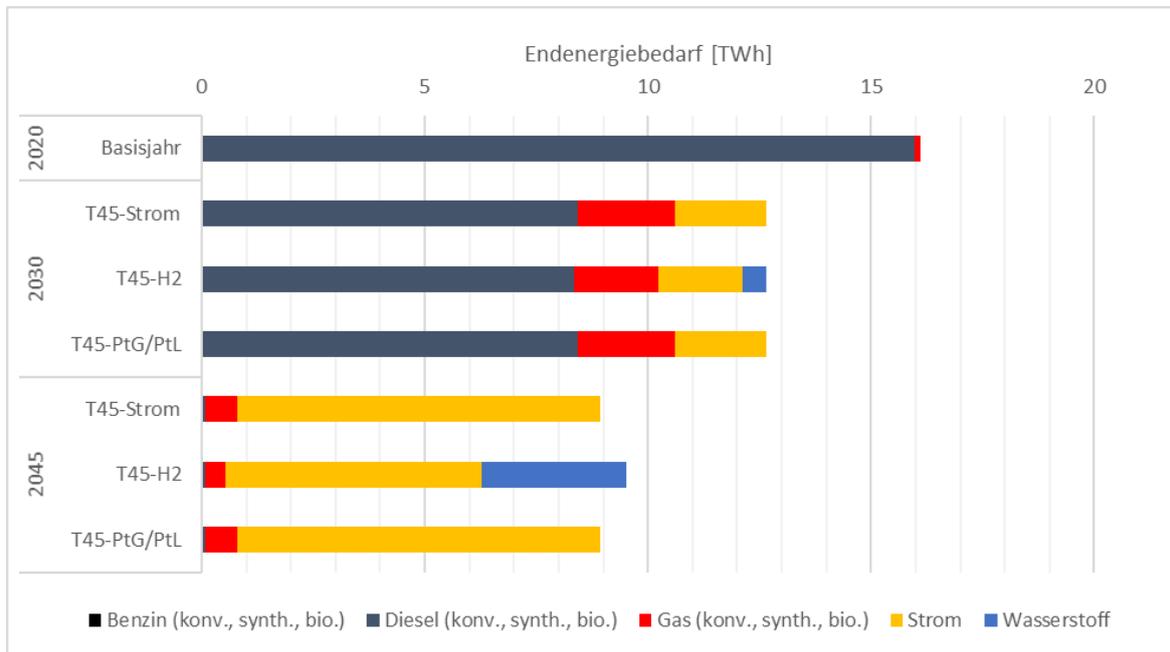
Berücksichtigt man sowohl Diesel als auch Gas, so verbleiben in den Szenarien *T45-Strom* und *T45-H<sub>2</sub>* jeweils deutlich weniger als 10 TWh Energiebedarf für schwere Nutzfahrzeuge, die aus biogenen oder synthetischen Quellen gedeckt werden müssen.

**Abbildung 17: Endenergiebedarf leichter Nutzfahrzeuge in den Szenarien *T45-Strom*, *T45-H<sub>2</sub>* und *T45-PtG/PtL* in den Jahren 2030 und 2045<sup>9</sup>**

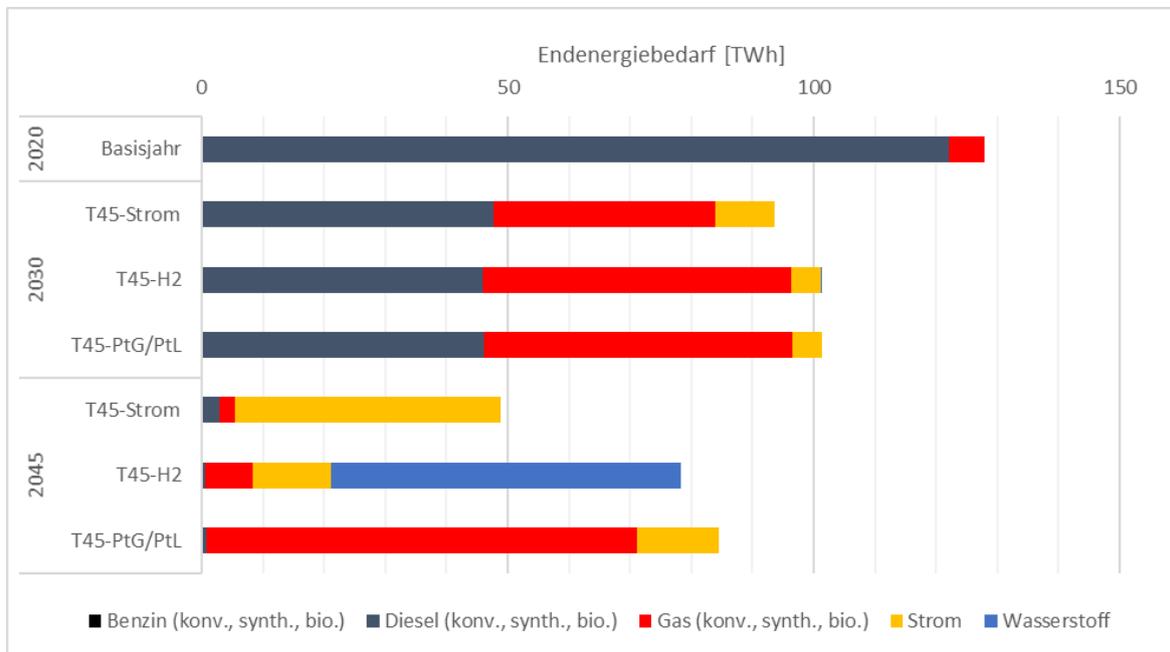


<sup>9</sup> Das Modell ALADIN stellt die Fahrzeugflotte und deren Energiebedarf als kontinuierliche Entwicklung dar. Auf die Modellierung einmaliger Sondereffekte, wie der massiv reduzierten Fahrleistung während der Covid19-Pandemie wird bewusst verzichtet. Das modellierte Basisjahr 2020 stellt somit eine valide Bezugsgröße dar, die sich in den Trend der Jahre 2019 und 2021 eingliedert.

**Abbildung 18: Endenergiebedarf mittlerer Nutzfahrzeuge in den Szenarien T45-Strom, T45-H<sub>2</sub> und T45-PtG/PtL in den Jahren 2030 und 2045<sup>10</sup>**



**Abbildung 19: Endenergiebedarf schwerer Nutzfahrzeuge in den Szenarien T45-Strom, T45-H<sub>2</sub> und T45-PtG/PtL in den Jahren 2030 und 2045<sup>10</sup>**



<sup>10</sup> Das Modell ALADIN stellt die Fahrzeugflotte und deren Energiebedarf als kontinuierliche Entwicklung dar. Auf die Modellierung einmaliger Sondereffekte, wie der massiv reduzierten Fahrleistung während der Covid19-Pandemie wird bewusst verzichtet. Das modellierte Basisjahr 2020 stellt somit eine valide Bezugsgröße dar, die sich in den Trend der Jahre 2019 und 2021 eingliedert.

### 4.5.3 Weitere Verkehrsträger

Der Endenergiebedarf der weiteren Verkehrsträger unterscheidet sich nur unwesentlich von den Ergebnissen der ersten Modellierungsrunde (Krail et al. (2021)). Es wurde eine frühere Durchdringung alternativer Antriebe im Schienenverkehr und im Busverkehr angenommen sowie die Nutzung von alternativen Antrieben im Luftverkehr bis 1000 km auch über die deutschen Landesgrenzen hinweg. Abbildung 20 zeigt die Ergebnisse der drei Szenarien untergliedert nach Energieträgern und Bezugsraum. Für die Einhaltung der Sektorziele ist nur der nationale Anteil des Schiffs- und Luftverkehrs von Belang, langfristig müssen die Energieträger für den internationalen Anteil auch in Deutschland zur Verfügung gestellt werden, weshalb beide Anteile in der Abbildung dargestellt sind.

Man erkennt deutlich, dass die gesamte Energiemenge zwischen 2020 und 2045 nahezu gleich bleibt und die Zunahme der Verkehrsleistung nur bedingt durch fahrleistungsunabhängige Energieeinsparungen zu kompensieren ist.

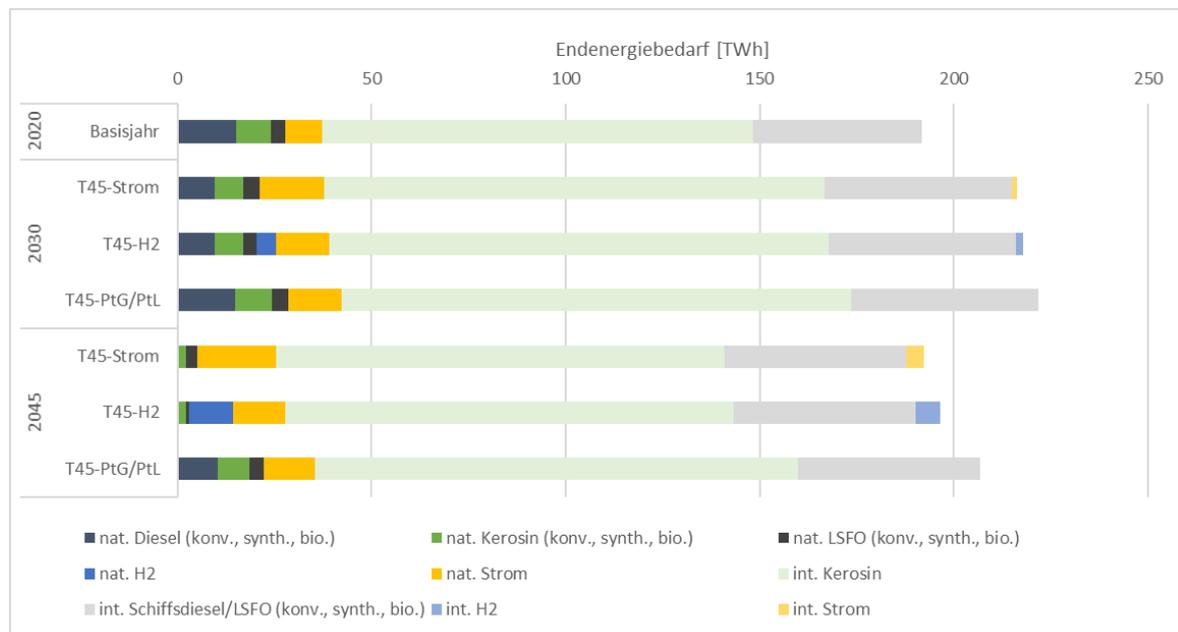
In den Szenarien *T45-Strom* und *T45-H<sub>2</sub>* wird im Busverkehr eine Bewältigung von 50 % der Fahrzeugkilometer mit alternativen Antrieben bis zum Jahr 2030 angenommen, bis 2045 sind es 100 %. In *T45-PtG/PtL* ist eine langsamere Durchdringung von 50 % der Fahrzeugkilometer bis 2045 mit elektrischen Antrieben unterstellt.

Im Schienenverkehr müssen die nichtelektrifizierten Kilometer ersetzt werden, also rund 10 % der gefahrenen Kilometer. Diese werden in den Szenarien *T45-Strom* und *T45-H<sub>2</sub>* zu 40 % im Jahr 2030 mit alternativen Antrieben (Batteriezüge (*T45-Strom*) oder Brennstoffzellenzüge (*T45-H<sub>2</sub>*)) bewerkstelligt, im Jahr 2045 zu 100 %. In *T45-PtG/PtL* muss die notwendige Kraftstoffmenge über biogene oder synthetische Kraftstoffe gedeckt werden - ein Antriebswechsel ist nicht vorgesehen.

In der Binnenschifffahrt sind keine Änderungen gegenüber den TN-Szenarien (Krail et al. 2021) angenommen, da die Bestandsumwälzung bis 2045 nicht schneller passieren kann. Haltedauern von 40-50 Jahren im Mittel machen hier eine Betrachtung von Motorwechseln notwendig, welche im Rahmen der Analysen betrachtet wurde. Die Nutzungsdauer eines Motors liegt jedoch auch bei einem Ersatz der Antriebe bei 25 Jahren, so dass eine Erneuerung der Flotte bis 2045 heute schon nicht mehr möglich ist. Zudem ist ein reiner Strombetrieb eher für einzelne Schiffe denkbar, so dass 2045 im Szenario *T45-Strom* 15 % der Schiffskilometer mit Strom ersetzt werden, im Szenario *T45-H<sub>2</sub>* sind bis zu 75 % der Kilometer mit Wasserstoff bewältigbar. Im Szenario *T45-PtG/PtL* werden synthetische oder biogene Kraftstoffe für die Schiffe benötigt.

In der Hochseeschifffahrt ist aufgrund des Platzmangels und der langen Zeiten auf See kein Einsatz von Strom oder Wasserstoff im großen Maßstab sinnvoll. In allen Szenarien wird daher der Endenergiebedarf über biogene oder synthetische Kraftstoffe gedeckt, analog zu Krail et al. (2021).

Im Luftverkehr kommen für Flüge bis 1000 km elektrisch oder wasserstoffbetriebene Flugzeuge in Betracht. Hier ist eine ambitionierte Durchdringung angenommen, die einen Marktanteil von 20 % der Streckenkilometer im Jahr 2030 umfasst (je nach Szenario mit Strom oder Wasserstoff betrieben) und 75 % im Jahr 2045. Aufgrund der langen Haltedauern von 25-30 Jahren ist auch hier eine frühere Durchdringung des Marktes als in den TN-Szenarien (Krail et al. 2021) eher nicht anzunehmen.

**Abbildung 20: Endenergiebedarf weiterer Verkehrsträger in den Szenarien T45-Strom, T45-H<sub>2</sub> und T45-PtG/PtL in den Jahren 2030 und 2045<sup>11</sup>**

#### 4.5.4 Regionaler Energiebedarf

Abbildung 21 stellt für die Szenarien *T45-Strom*, *T45-H<sub>2</sub>* und *T45-PtG/PtL* den regional verteilten Strombedarf im Jahr 2045 dar. Zusätzlich ist für die Szenarien *T45-Strom* und *T45-PtG/PtL* der Bedarf nach kohlenstoffhaltigen Energieträgern dargestellt. Für das Szenario *T45-H<sub>2</sub>* wird der Wasserstoffbedarf ausgewiesen.

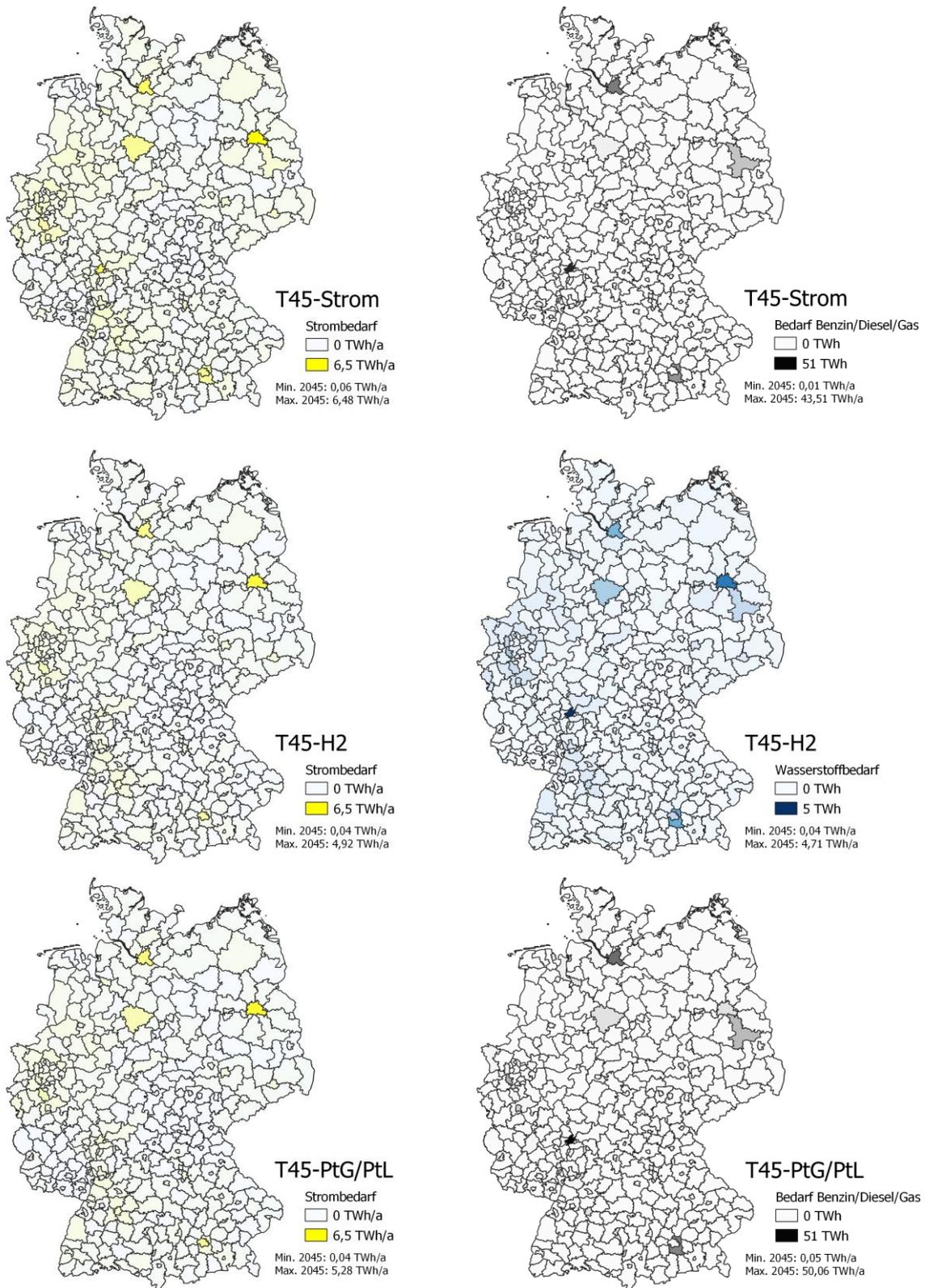
Bezüglich des Strombedarfs ist zu erkennen, dass hohe Bedarfe insbesondere in Großstädten sowie urbanen Regionen entstehen. Berlin weist dabei in allen Szenarien den höchsten Strombedarf für den Verkehr aus. Der höhere Bedarf im Szenario *T45-Strom* im Vergleich zu den beiden anderen Szenarien zeichnet sich ebenfalls ab.

Wasserstoff wird nur im Szenario *T45-H<sub>2</sub>* nachgefragt. Die Nachfrage verteilt sich sehr ähnlich zur Nachfrage nach Strom. Die größte Nachfrage entsteht jedoch auch hier in Frankfurt am Main. Gemäß den getroffenen Annahmen wird im Szenario *T45-H<sub>2</sub>* der Flugverkehr bis 1000 km mit Wasserstoff abgewickelt.

Eine leicht andere Situation zeigt sich bei synthetischen Kraftstoffen. Im Szenario *T45-PtG/PtL* verteilt sich die Nachfrage von Pkw und Lkw ähnlich wie die Nachfrage nach Strom auf die Fläche. Hohe Nachfragen von Pkw und Lkw treten wiederum in Großstädten auf. Dies ist beispielsweise zu erkennen, wenn man für Berlin die Szenarien *T45-Strom* und *T45-PtG/PtL* vergleicht. Gleichzeitig wird die Nachfrage in allen Szenarien jedoch von Punktnachfragen für Schiffs- und Flugverkehr an (Flug-)Häfen dominiert. Der Bedarf ist in diesen Bereichen um mehrere Dimensionen höher als der Bedarf des straßengebundenen Verkehrs. Die größte Nachfrage nach kohlenstoffhaltigen Kraftstoffen entsteht daher in allen Szenarien in Frankfurt am Main, um den dortigen Flughafen zu versorgen.

<sup>11</sup> Das Modell ALADIN stellt die Fahrzeugflotte und deren Energiebedarf als kontinuierliche Entwicklung dar. Auf die Modellierung einmaliger Sondereffekte, wie der massiv reduzierten Fahrleistung während der Covid19-Pandemie wird bewusst verzichtet. Das modellierte Basisjahr 2020 stellt somit eine valide Bezugsgröße dar, die sich in den Trend der Jahre 2019 und 2021 eingliedert.

**Abbildung 21: Regionaler Endenergiebedarf in den Szenarien T45-Strom, T45-H<sub>2</sub> und T45-PtG/PtL für das Jahr 2045**

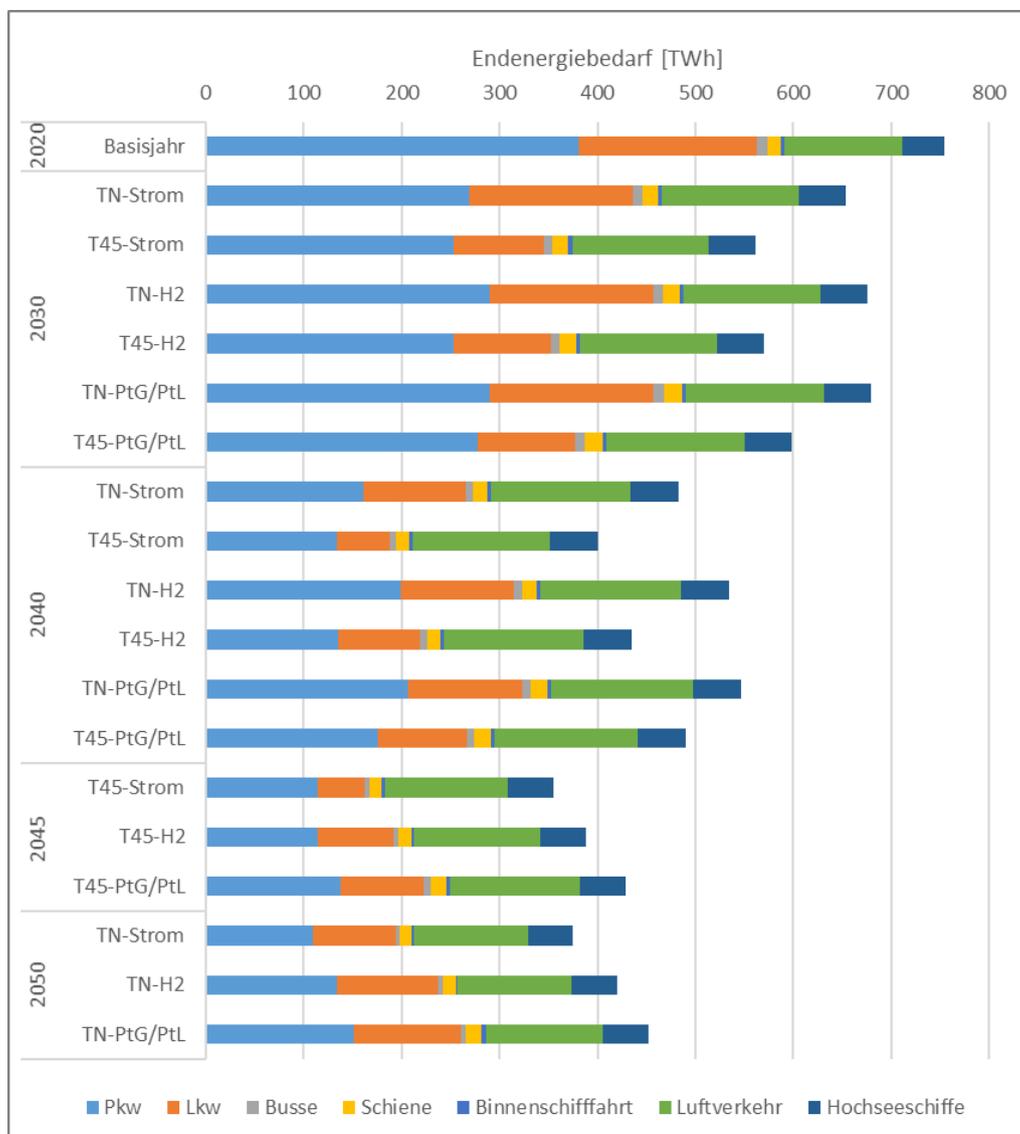


Hintergrundkarte: GeoBasis-DE / BKG 2020

## 4.6 Vergleich mit den TN-Szenarien

Wie bereits in den einzelnen Abschnitten angerissen, liegt der Hauptunterschied zu den TN-Szenarien in Krail et al. (2021) vor allem in der deutlichen Beschleunigung des Markthochlaufs alternativer Antriebe bis 2030, um das Sektorziel zu erreichen. Dies hat dann auch einen Effekt auf die Folgejahre. So kann eine Flottenumstellung bis 2045 für viele Verkehrsträger erfolgen (Pkw, Lkw, Bus und Bahn), andere werden auch aufgrund der Haltedauern weiterhin flüssige, kohlenstoffbasierte Kraftstoffe benötigen (Schiffs- und Luftverkehr). Die größten Änderungen sind im Pkw- und Lkw-Bereich zu verzeichnen, insbesondere auch durch die vielfachen politischen Anpassungen und Zielvorgaben (vgl. Abschnitt 3.4).

**Abbildung 22: Endenergiebedarf aller Verkehrsträger in den Szenarien TN-Strom, TN-H<sub>2</sub> und TN-PtG/PtL, T45-Strom, T45-H<sub>2</sub> und T45-PtG/PtL in den Jahren 2030, 2040, 2045 und 2050<sup>12</sup>**



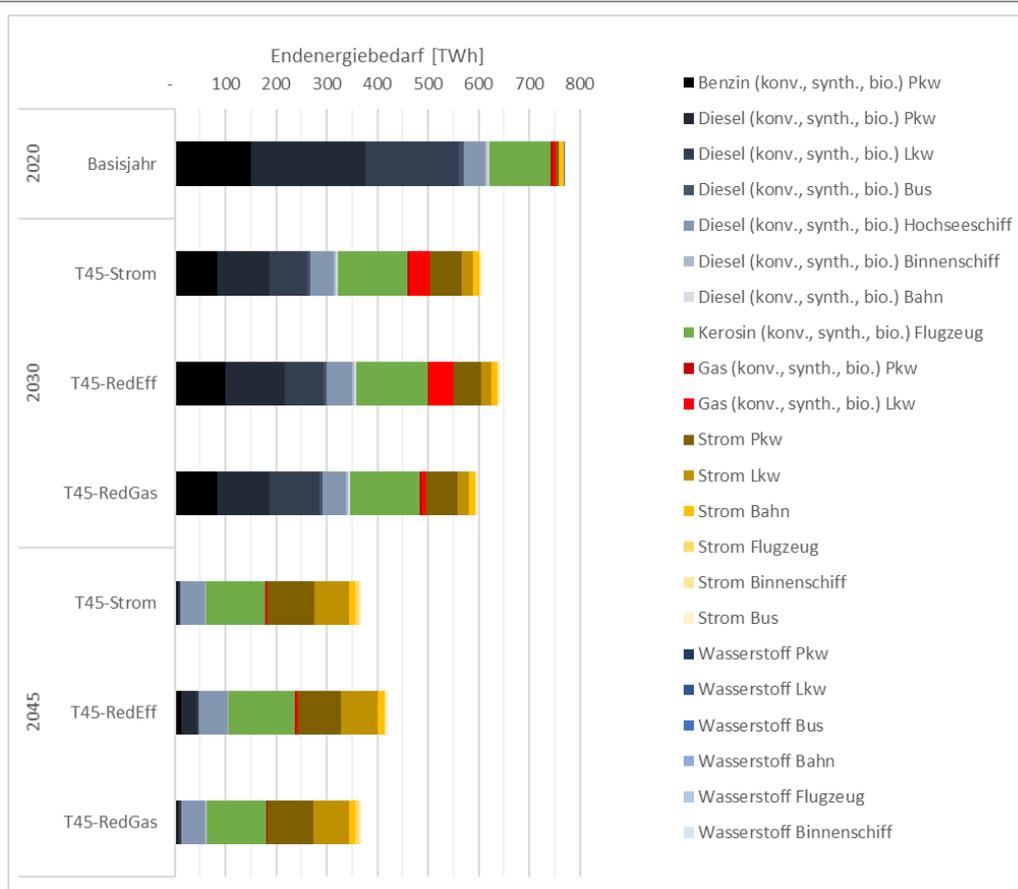
<sup>12</sup> Das Modell ALADIN stellt die Fahrzeugflotte und deren Energiebedarf als kontinuierliche Entwicklung dar. Auf die Modellierung einmaliger Sondereffekte, wie der massiv reduzierten Fahrleistung während der Covid19-Pandemie wird bewusst verzichtet. Das modellierte Basisjahr 2020 stellt somit eine valide Bezugsgröße dar, die sich in den Trend der Jahre 2019 und 2021 eingliedert.

## 5 Ergebnisse der Szenarien T45-RedEff, T45-RedGas

In den Variationsrechnungen sollen basierend auf dem Szenario *T45-Strom* einzelne Entwicklungen überprüft und ihre Auswirkungen eingeordnet werden. Dazu wird das Szenario *T45-RedEff* simuliert, das eine Halbierung der Effizienz aller Verkehrsträger und Antriebsarten vorsieht. Alle weiteren Parameter bleiben gleich. Das Szenario *T45-RedGas* soll vor dem Hintergrund des Angriffskriegs Russlands in der Ukraine und damit einhergehenden Versorgungssicherheitsdiskussionen einen früheren Ausstieg aus der Gasnachfrage beleuchten. Hier wird das Fahrzeugangebot für Gasfahrzeuge und sukzessive auch die Infrastruktur vor allem im Lkw-Bereich reduziert.

Der Endenergiebedarf in den Szenarien *T45-Strom*, *T45-RedEff* und *T45-RedGas* ist in Abbildung 23 dargestellt. Hier sieht man, dass im Szenario *T45-RedEff* eine Erhöhung der gesamten Energienachfrage um 6 % im Jahr 2030 und 14 % in 2045 zu verzeichnen ist. Die Anteile der Verkehrsträger sind 2030 ähnlich zu *T45-Strom*, 2045 ist vor allem eine Zunahme der konventionellen Kraftstoffe (auch aufgrund von Antriebswechseln) im Luft- und Hochseeverkehr zu erkennen.

**Abbildung 23: Tiefgegliederter Endenergiebedarf in den Szenarien T45-Strom, T45-RedEff und T45-RedGas in den Jahren 2030 und 2045<sup>13</sup>**



Im Szenario *T45-RedGas* wird 2030 der Anteil der Lkw mit Gasantrieb durch elektrische Fahrzeuge ersetzt, 2045 ist in diesem Fall kein Unterschied zwischen *T45-Strom* und *T45-RedGas* zu verzeichnen. Die Zwischenlösung Gas-Lkw ist hier also ein Auslaufmodell.

<sup>13</sup> Das Modell ALADIN stellt die Fahrzeugflotte und deren Energiebedarf als kontinuierliche Entwicklung dar. Auf die Modellierung einmaliger Sondereffekte, wie der massiv reduzierten Fahrleistung während der Covid19-Pandemie wird bewusst verzichtet. Das modellierte Basisjahr 2020 stellt somit eine valide Bezugsgröße dar, die sich in den Trend der Jahre 2019 und 2021 eingliedert.

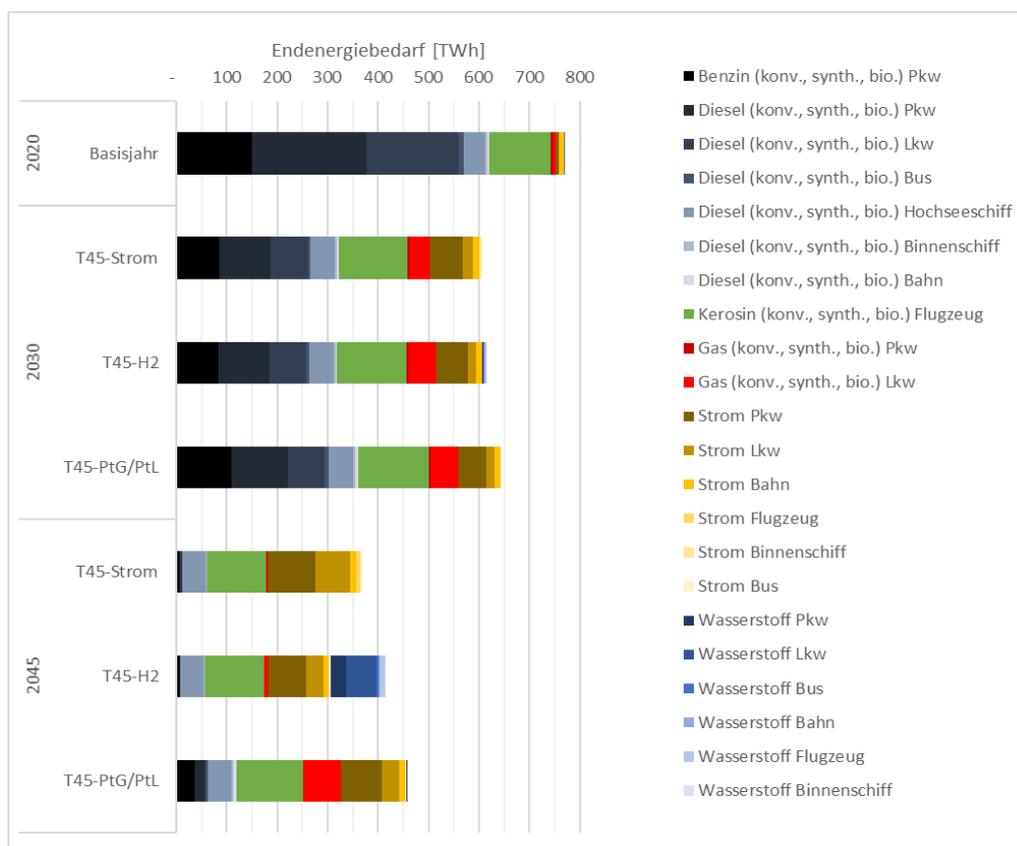
## 6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die hier dargestellten T45-Szenarien der Langfristszenarien 3 spannen einen möglichen Lösungsraum zur Defossilisierung des Verkehrssektors in Deutschland bis 2045 auf. Sie stellen dabei nicht die wahrscheinlichsten Pfade dar, sondern sind als Szenarien zu verstehen, welche die Ausprägungen in verschiedene Richtungen eines möglichen Lösungsraumes beleuchten. Sie stellen eine stärkere Fokussierung auf die Direktelektrifizierung (*T45-Strom*), auf direkten Wasserstoffeinsatz (*T45-H2*) oder auf flüssige oder gasförmige Kohlenwasserstoffe (*T45-PtG/PtL*) dar.

Den Szenarien ist gemeinsam, dass sie die aktuell beschlossenen energie- und klimapolitischen Zielvorgaben wie das Sektorziel im Verkehr zur Minderung der Treibhausgase im Jahr 2030 möglichst erreichen sollen. Zum Zeitpunkt der Modellierung bestehende gesetzliche Vorgaben und Förderinstrumente werden berücksichtigt. Die quantitativen Analysen erfolgen auf der Basis von etablierten Verkehrsmodellen. Diese erlauben sich abzeichnende Veränderungen im Mobilitätsverhalten zu berücksichtigen. Weiterhin erfolgt die Bewertung der Antriebswahl unter wirtschaftlichen Aspekten und auf breiter empirischer Basis.

Die Ergebnisse und Schlussfolgerungen werden im Folgenden dargestellt. Abbildung 24 enthält den Endenergiebedarf in den drei Hauptszenarien, gegliedert nach Energie- und Verkehrsträger.

**Abbildung 24: Tiefgegliederter Endenergiebedarf in den Szenarien *T45-Strom*, *T45-H2* und *T45-PtG/PtL* in den Jahren 2030 und 2045<sup>14</sup>**



<sup>14</sup> Das Modell ALADIN stellt die Fahrzeugflotte und deren Energiebedarf als kontinuierliche Entwicklung dar. Auf die Modellierung einmaliger Sondereffekte, wie der massiv reduzierten Fahrleistung während der Covid19-Pandemie wird bewusst verzichtet. Das modellierte Basisjahr 2020 stellt somit eine valide Bezugsgröße dar, die sich in den Trend der Jahre 2019 und 2021 eingliedert.

## Endenergiebedarf im Verkehrssektor

In allen drei Szenarien kommt es zu einer deutlichen Verringerung des Energieeinsatzes im Verkehr bis 2045. Der Rückgang liegt im Szenario *T45-Strom* bis 2045 bei 52 %, im Szenario *T45-PtG/PtL* bei 40 %. Das Szenario *T45-H<sub>2</sub>* liegt mit einer Reduktion um 46% dazwischen. Neben einem moderaten Verkehrsrückgang u.a. durch Home-Office, ist dafür die höhere Effizienz der direktelektrischen und wasserstoffbasierenden Antriebe ursächlich. Das Szenario *T45-PtG/PtL* weist den geringsten Rückgang auf, weil der Einsatz dieser Kraftstoffe gegenüber den konventionellen Kraftstoffen nicht zu nennenswerten Effizienzvorteilen führt. Im Zuge der aktuellen Diskussion um die Energieversorgungssicherheit ist der Unterschied in den Szenarien zu beachten. Weiterhin erkennt man, dass Kerosin für Flugzeuge sowie Diesel für die Schifffahrt absolut und insbesondere relativ an Bedeutung als Energieträger im Verkehr gewinnen. Neben dem landgebundenen Verkehr sollten deshalb diese Anwendungen bei künftigen Maßnahmen zur Verringerung der Treibhausgase ebenfalls verstärkt im Fokus stehen.

## Sektorziel Verkehr 2030

Das sektorale Minderungsziel für Treibhausgase im Verkehr bis 2030 ist ambitioniert, kann jedoch in den Szenarien *T45-Strom* und *T45-H<sub>2</sub>* eingehalten werden. Dies geht im Wesentlichen auf den deutlichen Anstieg der Elektrifizierung zurück. Insbesondere bei Pkw, aber auch bei Nutzfahrzeugen, sind hierfür jedoch größere Transformationsprozesse notwendig, die zügig angegangen werden müssen. Im Szenario *T45-PtG/PtL* kann die Minderung um 48 % gegenüber 1990 nur erreicht werden, wenn eine hohe Menge (50 TWh) an synthetischen Kraftstoffen bereitgestellt werden kann. Dies zu realisieren, gerade auch vor dem Hintergrund der Nutzungskonkurrenz um nachhaltigen Wasserstoff und erneuerbare Energieträger, ist kritisch zu reflektieren.

Auch 2045 werden Restmengen kohlenstoffhaltiger Kraftstoffe für Pkw und Nutzfahrzeuge benötigt. Dies lässt sich nur vermeiden, wenn entweder der Verkauf von Benzin- und Dieselfahrzeugen ab 2030 oder deren Betrieb ab 2045 verboten wird. Da jedoch ohnehin eine Nachfrage nach Flug- und Schiffskraftstoffen verbleibt, scheinen diese Restmengen vergleichsweise irrelevant.

## Pkw

Bei Pkw erscheint die Umstellung großer Teile der Flotte auf batterieelektrische Antriebe, unabhängig vom Szenario, aus heutiger Perspektive sicher. Im Vergleich zu den Szenarien der vorherigen Modellierungsrunde muss allerdings die Marktdurchdringung deutlich ambitionierter erfolgen, um das Sektorziel 2030 sowie die Treibhausgasneutralität 2045 zu erreichen. Die Berechnungen zeigen, dass das Ziel der Bundesregierung von 15 Millionen batterieelektrische Fahrzeuge 2030 zur Sektorzielerreichung unter den getroffenen Annahmen übererfüllt werden muss. Im Rahmen der Modellierung hat sich gezeigt, dass Brennstoffzellenfahrzeuge in Szenarien mit günstigen Bedingungen für Strom und synthetische Kraftstoffe nur in sehr geringen Stückzahlen in die Fahrzeugflotte diffundieren würden. Deshalb wurde davon ausgegangen, dass die Hersteller in diesen Szenarien keine Brennstoffzellenfahrzeuge anbieten würden und auch keine Infrastruktur aufgebaut würde. Falls Wasserstoff in einem zukünftigen Energiesystem günstig zur Verfügung steht, könnte ein Teil der Flotte - im hier vorliegenden Szenario *T45-H<sub>2</sub>* ca. 15 % - auf Brennstoffzellenfahrzeuge umgestellt werden. Dies sind im wesentlichen schwere Fahrzeuge mit hohen Reichweitenanforderungen.

Insgesamt ist die zügige Elektrifizierung der Pkw-Fahrzeugflotte eine zentrale Voraussetzung für die Erreichung des Sektorziels im Verkehr. Die Schaffung günstiger Rahmenbedingungen - zum Beispiel die Förderung von Ladeinfrastruktur, finanzielle Kaufanreize oder Zufahrtsbeschränkungen in Städten - ist daher notwendig, um die Umstellung weiter zu beschleunigen.

## Nutzfahrzeuge

Die Analysen zeigen, dass für Nutzfahrzeuge die Flottenumstellung im Vergleich zu Szenarien der vorherigen Modellierungsrunde deutlich beschleunigt wird. Bei leichten Nutzfahrzeugen bis 3,5 t zulässigem Gesamtgewicht kann bis 2030 in allen Szenarien knapp mehr als die Hälfte der Flotte auf batterieelektrische Antriebe umgestellt werden. Langfristig findet für leichte Nutzfahrzeuge in allen Szenarien eine nahezu vollständige Elektrifizierung statt. Bei mittleren Nutzfahrzeugen bis 12 t zulässigem Gesamtgewicht findet ebenfalls eine weitgehende Umstellung der Flotte auf batterieelektrische Antriebe statt. Bis 2030 wird in allen drei Szenarien mehr als ein Drittel der Bestandsflotte elektrifiziert. 2045 sind in allen Szenarien mindestens 80 % der mittleren Nutzfahrzeuge elektrifiziert. Im Szenario T45-Strom wird die Flotte nahezu vollständig umgestellt. Bei schweren Nutzfahrzeugen mit einem zulässigen Gesamtgewicht über 12 t findet ebenfalls eine Elektrifizierung der Flotte statt. Bis 2030 wird, leicht variierend zwischen den Szenarien, ein Viertel der Bestandsflotte mit elektrischen Antrieben ausgestattet. Nach 2030 wird - je nach Szenario - verstärkt auf Strom, Wasserstoff oder synthetische Kraftstoffe gesetzt.

Infrastruktur ist an dieser Stelle von zentraler Bedeutung. Für Fahrzeuge mit kurzen und mittleren Fahrstrecken ist der batterieelektrische Antrieb mittelfristig in der Regel die kostengünstigste Option, so dass sein Anteil 2045 in allen Szenarien bei über 40 % liegt. Auf der Langstrecke bestimmt die Infrastruktur (Schnellladesäulen, Wasserstofftankstellen oder Oberleitungssysteme) maßgeblich welche Antriebstechnologie zum Einsatz kommt. Die hier beschriebenen Szenarien bleiben bewusst teilweise hinter dem Kommissionsvorschlag zur Alternative Fuels Infrastructure Directive (European Commission 2021b) zurück, um jeweils den Maximalbedarf an Strom, Wasserstoff oder synthetischem Kraftstoff im Verkehr zu bestimmen. Die Ergebnisse zeigen, dass elektrische Antriebsalternativen in der Regel die kostengünstigste Option, auch auf der Langstrecke, darstellen. Wasserstoff kann sich, trotz angenommener günstiger Rahmenbedingungen im Szenario *T45-H<sub>2</sub>*, erst nach 2030 in größerem Umfang etablieren.

Das Ziel der Bundesregierung, bis 2030 ein Drittel der Fahrleistung schwerer Nutzfahrzeuge elektrisch oder auf Basis strombasierter Kraftstoffe zu erbringen, konnte in den Szenarien nicht ganz erreicht werden. Zwar unterstützen die vergleichsweise kurzen Lebenszyklen bei Nutzfahrzeugen eine schnelle Flottenumstellung, allerdings ist unklar, wie schnell entsprechende Fahrzeuge für den Langstreckeneinsatz in großen Stückzahlen zur Verfügung gestellt werden können.

Um einen möglichst hohen Beitrag der Nutzfahrzeuge zum Erreichen des Sektorziels 2030 sicherzustellen, sind günstige Rahmenbedingungen für elektrische Antriebe essentiell. Dazu zählen zum einen Maßnahmen zur Sicherstellung der Nachfrage, beispielsweise Kaufprämien und Mautbefreiung. Zum anderen könnten angebotsseitige Maßnahmen, zum Beispiel die weitere Verschärfung der Flottengrenzwerte, zumindest teilweise die Produktion in hohen Stückzahlen fördern. Abschließend stellt insbesondere die verfügbare Infrastruktur einen grundlegenden Faktor für die Diffusion alternativer Antriebe bei Nutzfahrzeugen dar. Zügige Entscheidungen für den Aufbau von Tankstellen und Ladestationen sind deshalb notwendig, um Batterie- und/oder Brennstoffzellenfahrzeuge bis 2030 und darüber hinaus im Langstreckeneinsatz zu etablieren.

## Schiffe und Flugzeuge

Für Schiffe und Flugzeuge sollten Alternativen, beispielsweise Biomass-to-Liquid (BtL) und Power-to-Liquid (PtL), mit günstigen Vermeidungskosten weiter erforscht werden. Aufgrund der langen Lebensdauer von Schiffen und Flugzeugen erscheint der Einsatz von BtL beziehungsweise PtL zumindest mittelfristig sehr wahrscheinlich. Alternative Antriebe, zum Beispiel Batterie- oder Brennstoffzellenflugzeuge werden erforscht, stehen jedoch noch am Beginn ihrer Entwicklung und werden bis 2045 einen Beitrag nur auf der Kurzstrecke mit kleineren Flugzeugen leisten können. Ihr langfristiger Beitrag ist daher mit heutigem Wissensstand noch schwierig zu beurteilen.

## 1 Literatur

---

- Brockmann, D.; Robert Koch Institut (2022): Covid-19 Mobility Project. Online verfügbar unter <https://www.covid-19-mobility.org/de/mobility-monitor/>.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.) (2021): Bekanntmachung der Richtlinie über die Förderung von leichten und schweren Nutzfahrzeugen mit alternativen, klimaschonenden Antrieben und dazugehöriger Tank- und Ladeinfrastruktur für elektrisch betriebene Nutzfahrzeuge (reine Batterieelektrofahrzeuge, von außen aufladbare Hybridelektrofahrzeuge und Brennstoffzellenfahrzeuge).
- Deutscher Bundestag (Hrsg.) (2021): Bundes-Klimaschutzgesetz vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2513), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 18. August 2021 (BGBl. I S. 3905) geändert worden ist. KSG.
- European Commission (Hrsg.) (2021a): Proposal for a council directive restructuring the Union framework for the taxation of energy products and electricity (recast).
- European Commission (2021b): Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on the deployment of alternative fuels infrastructure, and repealing Directive 2014/94/EU of the European Parliament and of the Council, zuletzt geprüft am 09.11.2021.
- Gnann, T.; Speth, D.; Plötz, P.; Wietschel, M.; Krail, M. (2022): Markthochlaufszszenarien für Elektrofahrzeuge – Rückblick und Ausblick bis 2030. In: Working Papers Sustainability and Innovation, 2022 (05).
- Hülsmann, F.; Mottschall, M.; Hacker, F.; Kasten, P. (2014): Konventionelle und alternative Fahrzeugtechnologien bei Pkw und schweren Nutzfahrzeugen - Potenziale zur Minderung des Energieverbrauchs bis 2050. Working Paper. Öko-Institut.
- Krail, M.; Speth, D.; Gnann, T.; Wietschel, M. (2021): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Treibhausgasneutrale Hauptszenarien - Modul Verkehr. Auftraggeber: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi).
- Lutsey, N. (2017): Cost Projection of State of the Art Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles Up to 2030. In: Energies, 10 (9), S. 1314. <https://doi.org/10.3390/en10091314>.
- Mottschall, M.; Kasten, P.; Kühnel, S.; Minnich, L. (2019): Sensitivitäten zur Bewertung der Kosten verschiedener Energieversorgungsoptionen des Verkehrs bis zum Jahr 2050 - Abschlussbericht. Abschlussbericht. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Dessau-Roßlau: Öko-Institut.
- 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). Berlin.
- Pfluger, B.; Tersteegen, B.; Franke, B.; Bernath, C.; Bossmann, T.; Deac, G.; Elsland, R.; Fleiter, T.; Kühn, A.; Ragwitz, M.; Rehfeldt, M.; Steinbach, J.; Cronenberg, A.; Ladermann, A.; Linke, C.; Maurer, C.; Willemsen, S.; Kauertz, B.; Pehnt, M.; Rettenmaier, N.; Hartner, M.; Kranzl, L.; Schade, W.; Catenazzi, G.; Jakob, M.; Reiter, U. (2017): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland - Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Modul 10.a: Reduktion der Treibhausgasemissionen Deutschlands um 95 % bis 2050 Grundsätzliche Überlegungen zu Optionen und Hemmnissen. Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI); Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (IFEU); TU Wien; TEP Energy; M-Five GmbH (M-Five); Consentec GmbH (Consentec), zuletzt geprüft am 23.09.2019.

- Sensfuss, F.; Maurer, C. (2022): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3. T45 Welten - Modul Rahmendaten. - noch nicht veröffentlicht -.
- SPD; Bündnis90/Die Grünen; FDP (Hrsg.) (2021): Mehr Fortschritt wagen. Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit. Koalitionsvertrag 2021— 2025 zwischen der Sozialdemokratischen Partei Deutschlands (SPD), Bündnis 90 / Die Grünen und den Freien Demokraten (FDP). Berlin.
- Speth, D.; Plötz, P.; Funke, S.; Vallarella, E. (2022): Public fast charging infrastructure for battery electric trucks—a model-based network for Germany. In: *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability*, 2 (2), S. 25004. <https://doi.org/10.1088/2634-4505/ac6442>.
- Wietschel, M.; Gnann, T.; Kühn, A.; Plötz, P.; Moll, C.; Speth, D.; Buch, J.; Boßmann, T.; Stütz, S.; Schellert, M.; Rüdiger, D.; Balz, W.; Frik, H.; Waßmuth, V.; Pauffler-Mann, D.; Rödl, A.; Schade, W.; Mader, S. (2017): Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw. Studie im Rahmen der Wissenschaftlichen Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie. Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur (BMVI). Karlsruhe: Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung; Fraunhofer Institut für Materialfluss und Logistik; PTV Group; MFIVE; Technische Universität Hamburg-Harburg.
- Zapf, M.; Pengg, H.; Bütler, T.; Bach, C.; Weindl, C. (2019): Kosteneffiziente und nachhaltige Automobile. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-24060-8>.