consentec

Fraunhofer ISI

Energy and Resources

ifeu

Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland

Treibhausgasneutrale Hauptszenarien
Modul Verkehr

Ort: Karlsruhe

Datum: 25.11.2021

Final

Impressum

Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in DeutschlandTreibhausgasneutrale Hauptszenarien - Modul Verkehr

Projektleitung

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Breslauer Straße 48, 76139 Karlsruhe
Dr. Frank Sensfuß, frank.sensfuss@isi.fraunhofer.de

Consentec GmbH
Grüner Weg 1, 52070 Aachen
Dr. Christoph Maurer, maurer@consentec.de

Autoren

Dr. Michael Krail, michael.krail@isi.fraunhofer.de
Daniel Speth, daniel.speth@isi.fraunhofer.de
Dr. Till Gnann, till.gnann@isi.fraunhofer.de
Prof. Dr. Martin Wietschel, martin.wietschel@isi.fraunhofer.de

Beteiligte Institute

Consentec GmbH
Grüner Weg 1, 52070 Aachen
Dr. Christoph Maurer, 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 (Projektleitung)
Gerda Deac, gerda.deac@isi.fraunhofer.de (Projektmanagement)

ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg
Im Weiher 10, 69121 Heidelberg
Peter Mellwig, peter.mellwig@ifeu.de

Technische Universität Berlin
Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin
Prof. Dr. Joachim Müller-Kirchenbauer, jmk@er.tu-berlin.de

Auftraggeber

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)
Scharnhorststr. 34-37, 10115 Berlin

Veröffentlicht

25.11.20221

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

1 Einleitung 4

2 Verkehr 5
2.1 Methodik 5
2.2 Sektorspezifische Rahmendaten 5
2.2.1 Energieträgerpreise in den treibhausgasneutralen Szenarien 5
2.2.2 Fahrzeugparameter 8
2.2.3 Technologische und energiepolitische Annahmen 10
2.3 Ergebnisse des Szenarios TN-Strom 12
2.3.1 Endenergiebedarf 12
2.3.2 Detailanalysen 14
2.4 Ergebnisse des Szenarios TN-PtG/PtL 29
2.4.1 Endenergiebedarf 29
2.4.2 Detailanalysen 33
2.5 Ergebnisse des Szenarios TN-H_2 46
2.5.1 Endenergiebedarf 46
2.5.2 Detailanalysen 49
2.6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen 61
2.6.1 Endenergiebedarf im Verkehr 61
2.6.2 Entwicklung einzelner Verkehrsträger 62
2.6.3 Zentrale Schlussfolgerungen 63
2.6.4 Optionen zur weiteren Beschleunigung der Treibhausgasreduktion 64

3 Anhang 66

4 Abbildungsverzeichnis 70

5 Tabellenverzeichnis 72

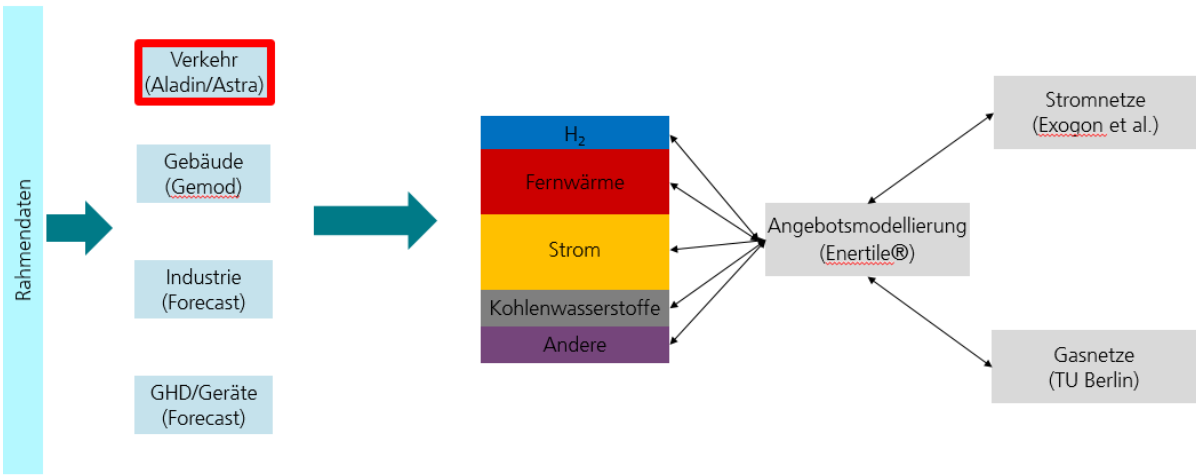
6 Literatur 73

1 Einleitung

Im Projekt „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland“ (Langfristszenarien 3) werden im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie 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, GHD&Geräte, Energieangebot, Gasnetze und Stromnetze, um eine möglichst hohe Auflösung zu erreichen.

Abbildung 1 Modellverbund im Projekt



In einem ersten Schritt werden im Projekt drei Szenarien berechnet, die sich hinsichtlich der Bedeutung der in den Nachfragesektoren eingesetzten Energieträger für die Dekarbonisierung unterscheiden. Das Szenario TN-Strom setzt auf eine starke Elektrifizierung des Energiesystems, um Treibhausgasneutralität zu erreichen. Das Szenario TN-H_2-G setzt auf eine starke Nutzung von grünem Wasserstoff im Energiesystem. Das Szenario TN-PtG/PtL setzt auf eine starke Nutzung von synthetischen Kohlenwasserstoffen im Energiesystem.

Dieses Berichtsmodul stellt die Methodik und die Ergebnisse für den Bereich Verkehr dieser ersten Szenarioanalyse treibhausgasneutraler Szenarien dar.

2 Verkehr

2.1 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:

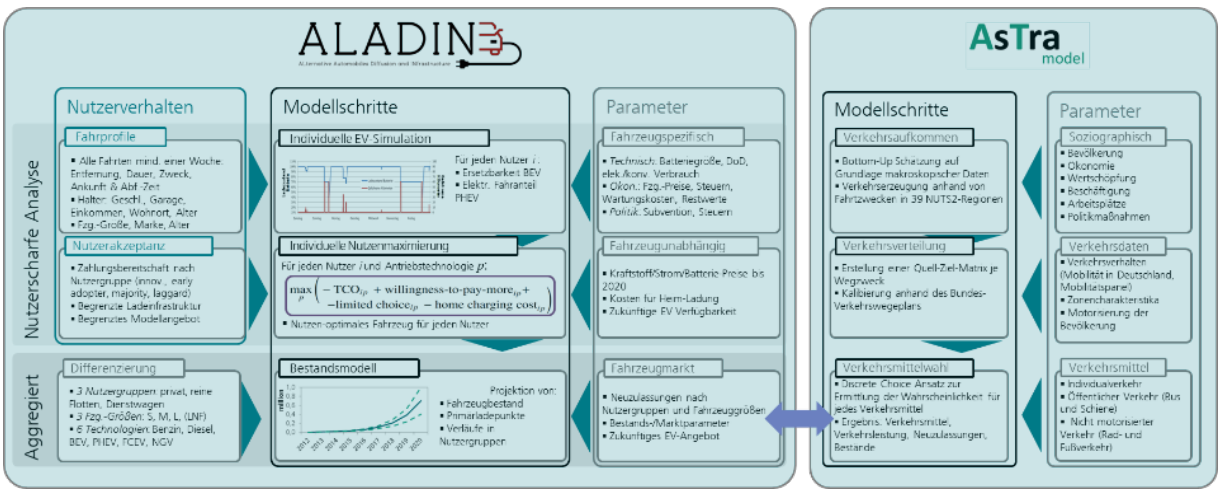
- Bodengebundener, territorialer Verkehr (inkl. Binnenschifffahrt)
- Luftverkehr
- Seeschifffahrt

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 beschrieben.

Zur agentenbasierten Modellierung der Kaufentscheidung und Antriebswahl wird das Modell *ALADIN* - **Al**ternative **A**ntriebe **Di**ffusion und **In**frastruktur - verwendet. Für die Langfristszenarien 3 wurde *ALADIN* erweitert, so dass nun, neben Pkw- und Lkw-Kaufverhalten, auch das Kaufverhalten bei Binnenschiffen, Seeschiffen und Flugzeugen abgebildet werden kann.

Abbildung 2 zeigt beispielhaft das Zusammenspiel zwischen *ASTRA-M* und *ALADIN* für Pkw.

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



2.2 Sektorspezifische Rahmendaten

2.2.1 Energieträgerpreise in den treibhausgasneutralen Szenarien

Die Energieträgerpreise beeinflussen die operativen Kosten eines Fahrzeuges wesentlich. Die Rahmendaten der Energieträgerpreise - Ölpreis, Gaspreis, Stromgestehungskosten und CO_2-Preise - sind für die Langfristszenarien zentral festgelegt. Der Benzin- und Dieselpreis ohne Steuern und Abgaben enthält zudem einen Gewinnaufschlag, der auch etwaige saisonale Schwankungen ausgleicht. Um diese auch über mehrere Jahre zu berücksichtigen, wird für konventionelle Kraftstoffe das zehnjährige Mittel über die Kraftstoffpreise ohne Steuern im Verhältnis zum Ölpreis gebildet und dieses Verhältnis mit den zukünftigen Ölpreisen multipliziert (Daten aus MWV (2020)). Das Vorgehen für Gas ist an dieser Stelle

analog. Für strombasierte Kraftstoffe werden die in Tabelle 1 dargestellten Kosten angenommen. Mittelfristig liegen die Bereitstellungskosten für H_2, aufgrund des notwendigen weiteren Aufbaus der Tankstelleninfrastruktur, die in den nächsten Jahren noch nicht gut ausgelastet sein wird, sowie des Kraftstofftransports, noch höher als die Kosten für PtG und PtL. Dabei wird für H_2 eine Kostendegression für Transport und Infrastruktur von 7 ct/kWh in 2030 auf 4 ct/kWh in 2050 angenommen. Langfristig sind PtL und PtG aufgrund zusätzlicher Prozessschritte leicht teurer als H_2.

Tabelle 1: Bereitstellungskosten für strombasierte Kraftstoffe

Alle Kosten inklusive Transport und Bereitstellung an Tankstelleninfrastruktur

	Einheit	2020	2030	2040	2050
Bereitstellungskosten PtH_2	€/kWh	0,285	0,220	0,150	0,120
Bereitstellungskosten PtG	€/kWh	0,300	0,195	0,16	0,122
Bereitstellungskosten PtL	€/kWh	0,300	0,205	0,17	0,132

Zusätzlich zu den in der Tabelle dargestellten Kosten wird ein Gewinnaufschlag in Höhe von 30 % auf PtX-Kraftstoffe berücksichtigt, um auf Preise zu kommen. Zur Ermittlung der Energieträgerpreise wird für Benzin, Diesel und Gas eine Beimischungsquote festgelegt, die bestimmt, zu welchem Anteil der PtX-Kraftstoff den Preis beeinflusst. Der exakte Bedarf an PtX kann hingegen erst als Ergebnis des Energieangebots über alle Sektoren hinweg bestimmt werden. Der angenommene Anteil der PtX-Kraftstoffe variiert zwischen den einzelnen Szenarien, wie in Tabelle 2 dargestellt. Insbesondere wird im Szenario *TN-PtG/PtL* eine deutlich höhere Beimischung unterstellt, um den im Vergleich zu den anderen Szenarien erhöhten Bedarf emissionsfreien Kraftstoffs 2050 zu decken. In den Szenarien *TN-Strom* und *TN-H_2* ist der Bedarf an Benzin und Diesel geringer und kann voraussichtlich zu großen Teilen aus biogenen Kraftstoffen gedeckt werden, weshalb der Anteil synthetischer Kraftstoffe deutlich geringer ausfällt. Die hier beschriebene Beimischungsquote ist daher ein Instrument der Preisgestaltung und kann, insbesondere durch den Einsatz biogener Kraftstoffe, von der tatsächlichen Beimischung abweichen. Biogene Kraftstoffe können zwar etwas günstiger zur Verfügung gestellt werden als PtX-Kraftstoffe, es ist jedoch davon auszugehen, dass PtX-Kraftstoffe, falls sie in größeren Mengen benötigt werden, preissetzend sind. Daher wird der Preis im Szenario *TN-PtG/PtL* langfristig vollständig durch PtX gesetzt. In den Szenarien *TN-Strom* und *TN-H_2* wird ex ante davon ausgegangen, dass ein prozentual größerer Teil der Nachfrage aus biogenen Quellen gedeckt werden kann. Daher wird langfristig von einem geringeren Einfluss des PtX-Preises ausgegangen, der sich dann in der Beimischungsquote von angenommen 50 % zeigt. Der tatsächliche Anteil ergibt sich dann als Ergebnis der Gesamtbilanzen über alle Sektoren hinweg[1]. Bei Wasserstoff wird davon ausgegangen, dass ausschließlich erneuerbarer Wasserstoff preissetzend ist. Es handelt sich hier um einen Kraftstoff, der für den Verkehr gerade erst im Aufbau begriffen ist. Daher wird davon ausgegangen, dass hier direkt der Aufbau entsprechender Infrastrukturen für eine treibhausgasneutrale Zukunft den Preis bestimmt.

Tabelle 2: Beimischungsquote PtG und PtL im Verkehr

Berücksichtigte Beimischungsquote für Kostenbestimmung; tatsächliche Beimischung kann abweichen

	2020	2030	2040	2050
TN-Strom	0 %	10 %	20 %	50 %
TN-PtG/PtL	0 %	20 %	50 %	100 %
TN-H_2	0 %	10 %	20 %	50 %

[1] Ex post, nach der Modellierung aller Sektoren, zeigte sich, dass die Szenarien *TN-Strom* und *TN-H_2* weitestgehend ohne den Einsatz von PtX-Kraftstoffen auskommen. Dies bestätigt die getroffene Annahme.

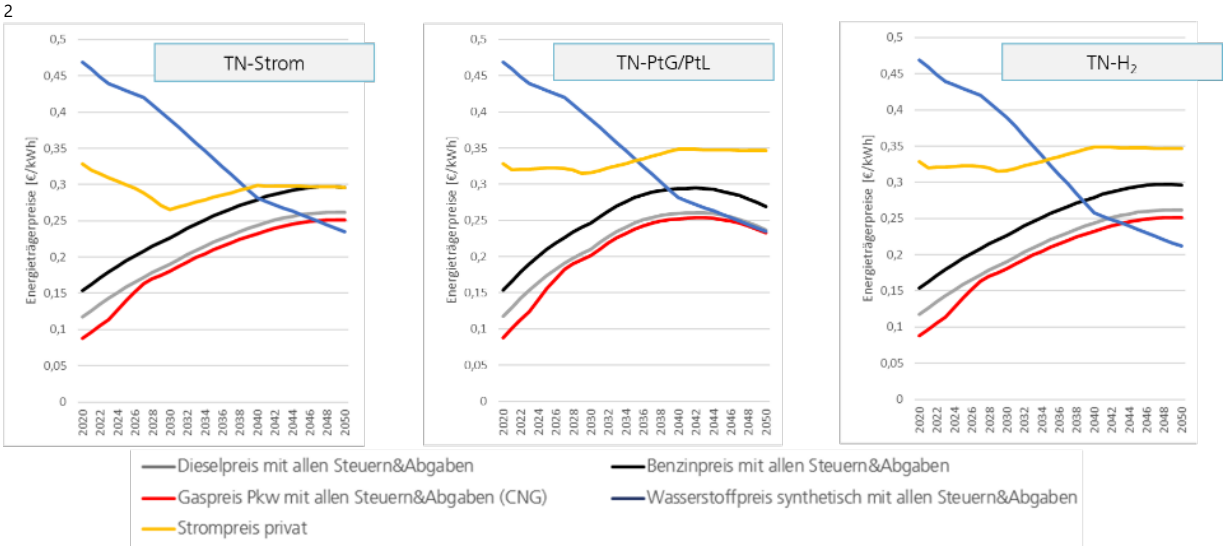
In die Kaufentscheidung gehen Endnutzerpreise ein, die zusätzlich Steuern und Abgaben berücksichtigen. Um eine deutliche Lenkungswirkung im Verkehr zu erzielen, sind die zentral festgelegten mittelfristigen CO_2-Preise für den Verkehrssektor zu gering. Daher wird für den Verkehrssektor in allen Szenarien eine zusätzliche CO_2-Abgabe für konventionelle Kraftstoffe berücksichtigt. Die zusätzliche CO_2-Abgabe beträgt 2030 in den treibhausgasneutralen Szenarien 50 €/t. Damit wird 2030 ein CO_2-Preis von 200 €/t im Verkehr sichergestellt. Im Jahr 2050 ist keine zusätzliche CO_2-Abgabe nötig. Der festgelegte CO_2-Preis in Höhe von 500 €/t entwickelt auch im Verkehrssektor eine ausreichende Lenkungswirkung.

Auf Benzin- und Dieselkraftstoffe wird die Energiesteuer in Höhe von 0,65 €/l (0,075 €/kWh) auf Benzin und 0,47 €/l (0,048 €/kWh) auf Diesel erhoben. Für gasförmige Kraftstoffe sind ebenfalls die Energiesteuer sowie Netzentgelte und Konzessionsabgaben zu zahlen (BDEW 2019). Für Pkw wird im Folgenden gasförmiges Erdgas (Compressed Natural Gas, CNG) eingesetzt und es gilt ein reduzierter Steuersatz, der bis 2027 ausläuft (EnergieStG §3). Daraus resultiert heute ein Aufschlag von 0,040 €/kWh, ab 2027 von 0,057 €/kWh. Für alle anderen Verkehrsträger wird dann angenommen, dass verflüssigtes Gas (Liquefied Natural Gas, LNG) eingesetzt wird, wobei für die Verflüssigung von einem Energieverlust von 10 % ausgegangen wird. Für Wasserstoff wird die Konzessionsabgabe sowie die Energiesteuer analog zu Erdgas angenommen, so dass heute Kosten in Höhe von 0,024 €/kWh, ab 2027 in Höhe von 0,042 €/kWh für den Endnutzer entstehen. Für Strom wird auf die in (Fleiter 2020) definierten Strompreise für Privat-, Gewerbe- und Industriekunden zurückgegriffen. Diese beinhalten bereits alle Steuern und Umlagen sowie Gewinnaufschläge. Für Privatkunden wird auf alle Energieträger zusätzlich eine Mehrwertsteuer in Höhe von 19 % aufgeschlagen.

Zwischen den einzelnen Szenarien werden die Kraftstoffpreise variiert, um die Szenarien zu differenzieren. Neben den Beimischungsquoten geschieht dies über Preisreduktionen, die beispielsweise als Steuersenkung realisiert werden könnten. Im Szenario *TN-Strom* wird der Strompreis für Privatkunden ab 2021 schrittweise reduziert, so dass ab 2030 eine Reduktion um 0,05 €/kWh erreicht wird. Diese vergleichsweise hohe Reduktion kann teilweise durch gesteuertes Laden erreicht werden. Im gewerblichen sowie industriellen Umfeld (öffentliches Laden Pkw, Lkw) ist das in der Regel nicht möglich. Daher wird an dieser Stelle keine Preisreduktion unterstellt, sondern auf die für die Langfristszenarien 3 festgesetzten Preispfade zurückgegriffen. Zusätzlich können Steuerreduktionen zur Förderung umweltfreundlicher Kraftstoffe eine Preissenkung bewirken. Im Szenario *TN-PtG/PtL* wird der Preis für Benzin, Diesel, CNG und LNG ab 2030 reduziert, so dass ab 2040 eine Reduktion um 0,02 €/kWh entsteht. Die Reduktion liegt in diesem Fall leicht über der heutigen Steuerreduktion für Erdgas in Höhe von 0,018 €/kWh. Im Szenario *TN-H_2* wird eine Reduktion in gleicher Höhe auf Wasserstoff angewendet.

Abbildung 3: Endenergiepreis für den Verkehr in den treibhausgasneutralen Szenarien

2



Quelle: eigene Berechnung

2.2.2 Fahrzeugparameter

Batterie- und Brennstoffzellenpreise sind wesentliche Einflussparameter für die Kaufentscheidung bei alternativen Antrieben. In den verschiedenen Szenarien werden dabei unterschiedliche techno-ökonomische Entwicklungen unterstellt. Im Szenario *TN-Strom* wird davon ausgegangen, dass die Preisreduktion für Batterien am stärksten ausfällt und 2050 Batteriepreise von 80 €/kWh erreicht werden können. Auch im Szenario *TN-H_2* wird zunächst von fallenden Batteriepreisen ausgegangen. Aufgrund unterstellter geringerer Absatzmengen fällt der Batteriepreis 2050 jedoch weniger stark als im Szenario *TN-Strom*. Im Szenario *TN-PtG/PtL* findet ab 2030 keine weitere Preisreduktion statt. Tabelle 3 fasst die entsprechenden Annahmen zusammen. Für Brennstoffzellen werden in allen Szenarien bis 2030 deutliche Preisreduktionen unterstellt. Im Szenario *TN-PtG/PtL* werden im Gegensatz zu den Szenarien *TN-Strom* und *TN-H_2* ab 2030 keine weiteren Kostensenkungen unterstellt, da die Brennstoffzelle hier nicht als Schlüsseltechnologie im Verkehr eingesetzt wird. Die deutlichste Reduktion der Brennstoffzellenpreise findet im Szenario *TN-H_2* statt. Basierend auf Mottschall et al. (2019) wird hier ein aus heutiger Sicht sehr optimistischer Preispfad gewählt, der 2050 Brennstoffzellenpreise, inklusive 30 % Markup, von 50 €/kW erreicht. Eine Übersicht der unterstellten Brennstoffzellenpreise findet sich in Tabelle 4.

Tabelle 3: Batteriepreise im Verkehr

Systemkosten exklusive Mehrwertsteuer (MwSt.)

		Einheit	2020	2030	2040	2050
TN-Strom	BEV	EUR/kWh	240	100	90	80
	PHEV	EUR/kWh	264	110	98	88
TN-PtG/PtL	BEV	EUR/kWh	240	120	120	120
	PHEV	EUR/kWh	264	132	132	132
TN-H_2	BEV	EUR/kWh	240	100	100	100
	PHEV	EUR/kWh	264	110	110	110

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

Tabelle 4: Brennstoffzellenpreise im Verkehr

Systemkosten exklusive Mehrwertsteuer (MwSt.)

	Einheit	2020	2030	2040	2050
TN-Strom	EUR/kW	234	80	66	55
TN-PtG/PtL	EUR/kW	234	80	80	80
TN-H_2	EUR/kW	234	78	62	50

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

2.2.2.1 Fahrzeugparameter für Pkw

Die Kaufentscheidung wird durch verschiedene Parameter bestimmt. Die grundlegende Entwicklung der Fahrzeuginvestitionen ist im Anhang dargestellt. In den Szenarien *TN-Strom* und *TN-H_2* wird ab 2030 eine ansteigende zusätzliche Zahlung für rein verbrennungsmotorisch angetriebene Fahrzeuge berücksichtigt, die bis 2050 auf 2.500 € ansteigt. Ein zusätzlicher Preisanstieg erscheint in Szenarien mit langfristig geringem Anteil verbrennungsmotorischer Fahrzeuge möglich zu sein, zum Beispiel aufgrund politischer Steuerungsinstrumente oder sinkender Skaleneffekte bei rückläufigem Produktionsvolumen.

Die unterstellten Batteriekapazitäten, die die Diffusion (teil-) elektrischer Antriebe sowohl im Rahmen der Fahrzeuginvestition als auch über die Fahrzeugreichweite beeinflussen, findet sich in Tabelle 5. Die von der Batteriekapazität abhängige Investition verändert sich im Rahmen der in Abschnitt 2.2.2 genannten Batteriepreise.

Tabelle 5: Angenommene Entwicklung der Batteriekapazität bei Pkw

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

		2020	2030	2050
BEV	klein	25	38	38
	mittel	45	69	69
	groß	73	100	100
PHEV	klein	8	12	12
	mittel	11	22	22
	groß	16	31	31

Quelle: Eigene Annahmen, basierend auf Helms et al. (2019)

Neben der Investition sind für die Wirtschaftlichkeitsberechnung Verbräuche und Wartungskosten relevant. Diese sind ebenfalls im Anhang enthalten.

2.2.2.2 Fahrzeugparameter für Nutzfahrzeuge

Analog zum Pkw-Sektor wurden die Basispreise der Fahrzeuge konstant gehalten. Veränderungen der Investition zwischen den Szenarien resultieren aus den in Abschnitt 2.2.2 beschriebenen Entwicklungen der Batterie- und Brennstoffzellenpreise. Im Szenario *TN-H_2* wird zusätzlich von weiteren Kostensenkungspotenzialen für H_2-Lkw, ausgelöst durch eine verstärkte Marktdurchdringung, ausgegangen.

In Tabelle 6 sind die unterstellten Batteriekapazitäten dargestellt.

Tabelle 6: Angenommene Entwicklung der Batteriekapazität bei Nutzfahrzeugen

Nutzbare Kapazität: 90 %

		Einheit	2020	2030	2050
BEV	<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	446
	SZM[2]	kWh	287	411	520
PHEV	<3,5t	kWh	33	43	61
	3,5-7,5t	kWh	81	107	117
	7,5-12t	kWh	110	133	164
HO-BEV[3]	>12t	kWh	169	169	169
	SZM	kWh	200	200	200

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

Die Annahmen zu Wartungskosten und Verbräuchen sind ebenfalls im Anhang hinterlegt.

2.2.2.3 Technische Effizienzverbesserungen weiterer Verkehrsträger

Für alle treibhausgasneutralen Szenarien gelten umfassende Annahmen zur Effizienzverbesserung des konventionellen Antriebsstrangs bzw. aller Antriebe.

[2] SZM - Sattelzugmaschine

[3] HO-BEV: rein elektrischer Hybridoberleitungs-Lkw, der durch eine Oberleitung mit Strom versorgt werden kann und abseits der Oberleitung batteriebetrieben fährt.

Im *Luftverkehr* werden aufgrund hoher CO_2-Preise verstärkt Effizienzmaßnahmen in konventionellen Flugzeugen ergriffen. Bei kleinen Flugzeugen kommen so erste Flugzeuge mit energieeffizienten Designanpassungen in den Markt. Ab 2025 werden Neuflugzeuge mit einem verbesserten Vortriebswirkungsgrad genutzt. In Summe ist, unabhängig von der Antriebswahl, eine Energieeffizienzverbesserung im Luftverkehr von 1,5 % p.a. bis 2030 und 1 % p.a. danach möglich. Dies bedeutet eine Effizienzverbesserung für neue Flugzeuge um 35 % im Jahr 2050 im Vergleich zu heute.

Im *Hochseeverkehr* erfüllen neue Schiffe die Vorgaben des Energy Efficiency Design Index (EEDI, siehe Folgeabschnitt) und eine Effizienzverbesserung von 2 % p.a. wird möglich. Zusätzlich werden ab 2025 Verhaltensanpassungen zur Energieeinsparung Vorschrift.[4] Diese umfassen Slow Steaming, reduzierte Umlaufzeiten in Häfen, Weatherrouting, optimierte Autopiloten und Rumpfbeschichtungen zur Reduktion von Reibungsverlusten. Auch eine intensive Landstromnutzung ist vorgeschrieben. Hierdurch werden 10 % Effizienzverbesserung für den Bestand ab 2040 möglich. Außerdem nutzt ein Teil der Schiffe zusätzliche Effizienztechnologien wie Segel, Drachen und Designanpassungen der Schiffe ab 2030 mit zusätzlichen 0,5 % p.a. Energieeffizienzverbesserung. In Summe werden antriebsunabhängig so bis zu 43 % Energieeffizienzverbesserungen im Bestand bis 2050 möglich.

Im *Schienenverkehr* wird in den TN-Szenarien von einer Effizienzverbesserung von 3 % in 10 Jahren ausgegangen. Im *Busverkehr* ist eine Effizienzsteigerung von 2 % p.a. zu erreichen. Zudem werden 50 % der Gesamtfahrleistung elektrisch zurückgelegt. In der *Binnenschifffahrt* wird die Effizienzsteigerung mit 1 % p.a. angenommen (vgl. auch (Timmerberg et al. 2018).

2.2.3 Technologische und energiepolitische Annahmen

In den hier vorgestellten treibhausgasneutralen Szenarien werden ambitionierte CO_2-Preise unterstellt. Die angenommene Erhöhung des CO_2 Preises in den treibhausgasneutralen Szenarien auf 500 €/t CO_2 bis 2050 wirkt sich, wie oben dargestellt, deutlich auf die Kraftstoffpreise aus. Es werden außerdem die mit dem Stichtag 31.12.2019 beschlossenen politischen Maßnahmen berücksichtigt:

- 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 %. Es wird angenommen, dass sich die Steuerreduktion zu 100 % auf die Senkung der Ticketpreise auswirkt.
- Stärkung des ÖPNV durch weitere finanzielle Mittel des Bundes (insgesamt 1,225 Mrd. Euro zusätzlich bis 2023). 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 2020. 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.

Neben den Maßnahmen aus dem Klimaschutzprogramm werden beispielhaft weitere Politikmaßnahmen berücksichtigt, die das Erreichen eines treibhausgasneutralen Verkehrs unterstützen. Der Fokus liegt an dieser Stelle jedoch nicht auf der Auswahl oder Bewertung einzelner Maßnahmen. Vielmehr sind die hier aufgeführten Maßnahmen als mögliche Optionen zu verstehen. Die Bewertung der Notwendigkeit von einzelnen Maßnahmen für die Zielerreichung ist nicht Gegenstand der Untersuchung:

- Europäische Vorgaben der transeuropäischen Verkehrsnetze in Form einer Verbesserung der Infrastruktur.
- Europäische Regulierungen für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge zu CO_2-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 %.

[4] Für eine Auswahl an Energieeffizienzmaßnahmen siehe Crist (2009) und (Halim et al. 2018).

- Kaufprämie für Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeuge im Zeitraum von 2016 bis 2025. Es wird davon ausgegangen, dass die Prämie die Kaufentscheidung nicht in ihrer vollen Höhe beeinflusst (Münzel et al. 2019). Stattdessen wird eine wirksame Prämie von maximal 4.000 EUR, abhängig vom Verkaufsjahr, angenommen.
- Vergünstigte Besteuerung von Elektrofahrzeugen als Dienstwagen. Dies unterstützt die Verbreitung alternativer Antriebe bei Dienstwagen.
- Einführung eines Tempolimits von 130 km/h auf deutschen Bundesautobahnen ab 2021. Dies reduziert den Endenergiebedarf der Fahrzeuge.
- Zunahme der Kosten des 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 einen sinkenden Durchschnittsverbrauch und einen verbesserten Verkehrsfluss auf Bundesautobahnen.
- Reduktion der Trassenpreise im Personenverkehr auf der Schiene um 10 % und im Schienengüterverkehr um 40 %.
- Zusätzliche Investitionen in den Ausbau der Fahrrad- und Fußgängerinfrastruktur. Dies führt zu einem moderaten Rückgang der Fahrt- bzw. Wegezeiten um 5 % bis 2050.
- Rückgang der Fahrtzeiten im Radverkehr bis 2050 um max. 20 % durch 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 2050.
- Implementierung ECTS Level 2 bis 2050 auf allen Hauptstrecken im Schienenverkehr. Dies bedeutet einen Rückgang der Fahrtkosten im Schienengüterverkehr um 3 % und der Fahrtzeiten um 4 % bis 2050.
- Einführung des Deutschlandtakts der Bahn ab 2025. Die Maßnahme führt zu einer um 10 % reduzierten Fahrzeit für Fernreisende im Bahnverkehr.
- Zusätzliche Senkung der EEG Umlage für Bahnstrom um 50 %.
- 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 ab 2022. Dies führt zu einer Verbesserung der Beladungsfaktoren im Schienengüterverkehr um 5 % bis 2050.
- Verbesserung der Beladungsfaktoren auf Binnenschiffen um 5 % bis 2030.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen den Szenarien ist die Bereitstellung von Infrastruktur für Nutzfahrzeuge. Im Szenario *TN-Strom* werden 8.000 km Oberleitung für Lkw aufgebaut. Dies entspricht knapp 2/3 des deutschen Autobahnnetzes. Aktuelle Untersuchungen zeigen, dass auch das Schnellladen von schweren Nutzfahrzeugen perspektivisch eine Alternative im schweren Straßengüterverkehr sein kann. Dies ist bislang im Modell noch nicht hinterlegt. Daher ist vorstellbar, dass ein Teil der Oberleitungs-Lkw und der dafür benötigten Infrastruktur als batterieelektrische Lkw mit Schnellladeoption realisiert werden kann. In den Szenarien *TN-PtG/PtL* und *TN-H_2* wird auf eine öffentliche Ladeinfrastruktur für elektrische Nutzfahrzeuge verzichtet, was bedeutet, dass diese keine Option in den beiden Szenarien darstellen.

Weitere Verkehrsträger

Eine Besonderheit des *Luftverkehrs* ist, dass auf Kraftstoffe keine Energiesteuer erhoben wird, um national und international konkurrenzfähig zu sein. Die Luftverkehrsabgabe und die verpflichtende Teilnahme am EU-ETS seit 2010 belasten die Energieträgerpreise in deutlich geringerem Maße als im Straßenverkehr. So sind beispielsweise die Einnahmen der Luftverkehrssteuer und des Emissionshandels auf 1,75 Mrd. € begrenzt (LuftVStG §11 Abs.2). Mit CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation) hat die Luftverkehrsbranche sich für ein CO_2-neutrales Wachstum ausgesprochen und

neben einem eigenen Emissionshandelssystem eine zweiprozentige jährliche Endenergieeinsparung für neue Flugzeuge zum Ziel. Dabei ist auch die Nutzung von nachhaltigen Kraftstoffen angestrebt (Bopst et al. 2019; Bullerdiek et al. 2020).

In der *Hochseeschifffahrt* sind die Kraftstoffe ebenfalls unbesteuert, um international konkurrenzfähig zu sein. Jedoch gibt es seit dem 01.01.2015 geltende Vorschriften für die Nutzung in bestimmten Gewässern (sogenannte ECA-Zone, die eine Nutzung in der Ostsee, Nordsee und den amerikanischen Küsten nur noch mit einem Schwefelgehalt unter 0,1 erlauben. Auch außerhalb dieser Gewässer ist seit dem 01.01.2020 nur noch ein Schwefelgehalt von 0,5 zulässig (IMO 2020b)). Dies erschwert damit indirekt die Nutzung von Schweröl ohne Abgasreinigung mittels Scrubber oder Katalysator, das bislang als Abfallprodukt aus der Raffinierung verwendet wurde und schreibt das schadstoffärmere LSFO (Low Sulfur Fuel Oil) vor. Zudem bedeuten die Vorlage eines Ship Energy Management Plan (SEEMP), der ähnlich zu einem Energieausweis eines Hauses zu sehen ist und zudem Effizienzmaßnahmen enthält, und der Energy Efficiency Design Index (EEDI), das neue Schiffe heute (2020) 10 % effizienter als 2010 und im Jahr 2030 30 % effizienter als 2010 sein müssen (IMO 2020a).

Die *Binnenschifffahrt* ist ebenfalls größtenteils steuerbefreit. Nach EnergieStG§27 Absatz 1 dürfen mineralölbasierte Kraftstoffe steuerfrei in der (Binnen-) Schifffahrt eingesetzt werden. Nach EnergieStG§44 Absatz 2b darf verflüssigtes Erdgas steuerfrei in der (Binnen-) Schifffahrt eingesetzt werden. Davon wird für die Schifffahrt zukünftig auch für Wasserstoff ausgegangen. Zur Elektrolyse verwendeter erneuerbarer Strom ist nach StromStG §9 Absatz 1 vollständig von der Stromsteuer befreit. Nach StromStG §9 Absatz 3 zahlen Schiffe einen ermäßigten Steuersatz von 50 €ct/MWh im Fall einer „landseitigen Stromversorgung", unter landseitige Stromversorgung fällt auch das Aufladen von Batterien.

2.3 Ergebnisse des Szenarios TN-Strom

2.3.1 Endenergiebedarf

Abbildung 4 stellt den Endenergiebedarf des Verkehrssektors im Szenario *TN-Strom* aufgeschlüsselt nach Verkehrsträgern dar. Dabei sinkt der gesamte Endenergiebedarf über die Zeit auf 375 TWh ab. Dies bedeutet, dass sich der Endenergiebedarf bis 2050 gegenüber 2018 halbiert. Die Entwicklung der einzelnen Verkehrsträger fällt dabei deutlich unterschiedlich aus.

Im *Pkw-Verkehr* geht die Endenergienachfrage gegenüber 2018 bis 2050 um 72 % zurück. Diese Reduktion kann nur durch strikte Elektrifizierung, deutliche Effizienzsteigerungen sowie eine Reduktion des Verkehrsaufkommens erreicht werden. Der Anteil der Pkw am Gesamtenergiebedarf im Verkehrssektor sinkt von heute über 50 % auf 30 % 2050 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. Elektrische Antriebe bieten gegenüber allen anderen Technologien die höchste Effizienz und ermöglichen damit deutliche Reduktionen im Endenergiebedarf.

Ähnlich wie beim Pkw-Verkehr existieren auch im *Lkw-Verkehr* Optionen zum Einsatz elektrischer Antriebe. Die Umstellung auf batterieelektrische Lkw oder Oberleitungs-Lkw sowie eine Reduktion des Verkehrs bei schweren Nutzfahrzeugen ermöglichen bis 2050 die Reduktion des Endenergiebedarfs um 54 %.

Bei *Bussen* wird im Szenario *TN-Strom* bis 2050 von einer vollständigen Umstellung auf elektrische Antriebe ausgegangen, so dass der Endenergiebedarf von 11 TWh auf 4 TWh zurückgeht.

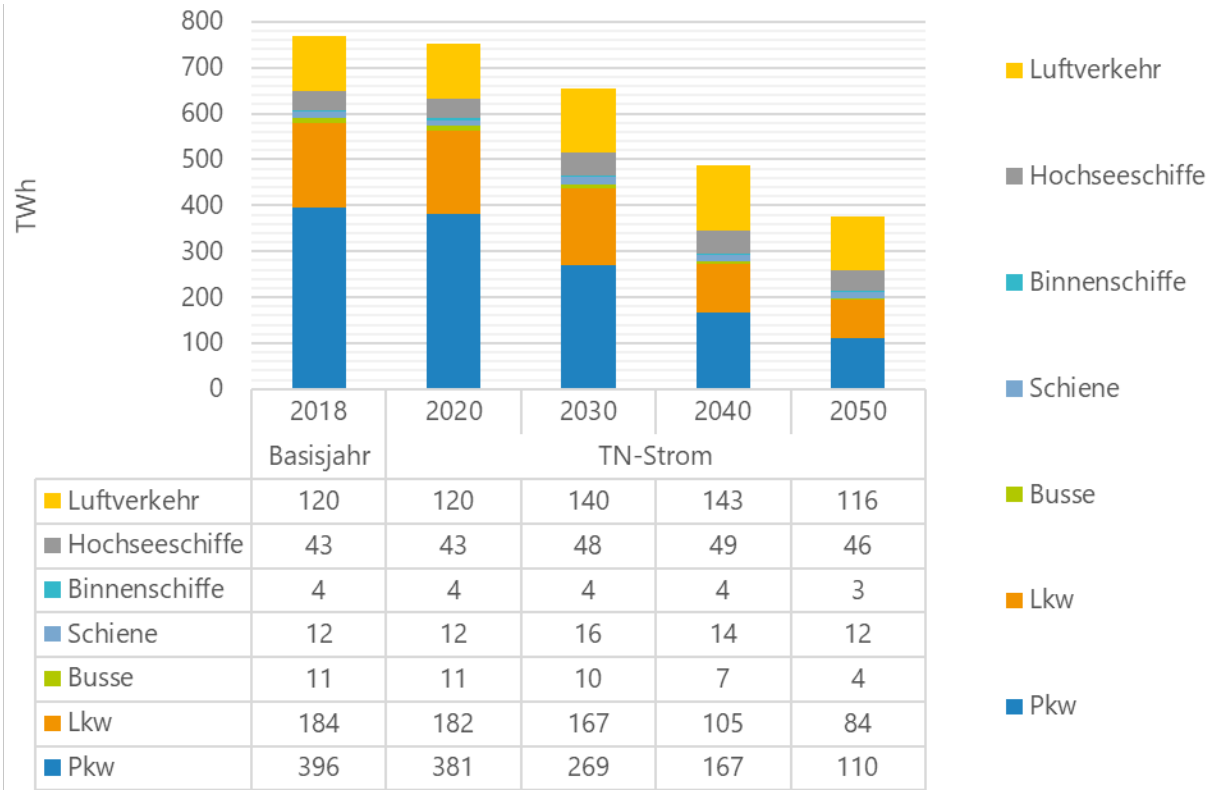
Der *Schienenverkehr* wird ebenfalls vollständig auf elektrische Antriebe umgestellt, abseits der Oberleitung kommen batterieelektrische Züge zum Einsatz. Aufgrund des hohen Ausgangsniveaus der Elektrifizierung sowie steigenden Verkehrsaufkommens steigt der Endenergiebedarf mittelfristig leicht an und erreicht 2050 wieder das heutige Niveau von 12 TWh.

Der Endenergiebedarf in der *Binnenschifffahrt* geht langfristig durch teilweise Elektrifizierung marginal zurück und verbleibt mit 3 TWh insgesamt auf niedrigem Niveau. Mit unter 1 % des Endenergiebedarfs 2050 ist die Binnenschifffahrt von nachrangiger Bedeutung.

Der Endenergiebedarf der *Hochseeschifffahrt* steigt im Szenario *TN-Strom* von 43 TWh auf 46 TWh leicht an. Der Anstieg des Verkehrsaufkommens wird dabei durch ambitionierte Effizienzsteigerungen gepuffert. Gleichzeitig verdoppelt sich der Anteil der Hochseeschifffahrt am Endenergiebedarf von 6 % heute auf 12 % 2050. Der Einsatz elektrischer Antriebssysteme erscheint in der Hochseeschifffahrt nach derzeitigem Wissensstand nicht möglich.

Im *Luftverkehr* steigt der Endenergiebedarf zunächst noch an, geht jedoch bis 2050 leicht zurück. Dafür sind deutliche Effizienzsteigerungen sowie die Umstellung des nationalen Verkehrs auf elektrische Flugzeuge notwendig. Dennoch verbleiben 2050 116 TWh Endenergiebedarf im Luftverkehr. Der Luftverkehr wird damit zum Verkehrsträger mit dem höchsten absoluten Endenergiebedarf und stellt 2050 knapp ein Drittel der gesamten Endenergienachfrage im Verkehr. Zu betonen ist, dass mögliche Auswirkungen der Corona-Pandemie auf die Luftfahrt nicht berücksichtigt wurden, unter anderem, weil hierzu noch belastbare Annahmen fehlen.

Abbildung 4: Endenergiebedarf des Verkehrs nach Verkehrsträgern im Szenario *TN-Strom*



	2018 Basisjahr	2020 TN-Strom	2030 TN-Strom	2040 TN-Strom	2050 TN-Strom
Luftverkehr	120	120	140	143	116
Hochseeschiffe	43	43	48	49	46
Binnenschiffe	4	4	4	4	3
Schiene	12	12	16	14	12
Busse	11	11	10	7	4
Lkw	184	182	167	105	84
Pkw	396	381	269	167	110

Abbildung 5 stellt den Endenergiebedarf im Szenario *TN-Strom* gegliedert nach Energieträgern dar. Der Rückgang des Endenergiebedarfs von 770 TWh auf 375 TWh beinhaltet deutliche Verschiebungen zwischen den einzelnen Endenergieträgern.

Die beschriebene Umstellung des landgebundenen Verkehrs hin zu elektrischen Antrieben führt dazu, dass der Anteil von *Benzin- und Dieselkraftstoffen* exklusive Schiffskraftstoffe von über 75 % auf circa 11 % zurückgeht. Die verbleibenden 10 TWh Benzin werden für die letzten konventionellen Verbrenner benötigt, die 2050 noch im Einsatz sind. Der Dieselbedarf von 29 TWh dient im Wesentlichen zur Versorgung von Hybrid-Lkw abseits der Oberleitungsstrecken. Der Bedarf wird voraussichtlich aus biogenen Quellen gedeckt. Zur Reduktion des Dieselkraftstoffes tragen insbesondere auch der ambitionierte Ausbau der Oberleitungsinfrastruktur auf 8.000 km und die vollständige Umstellung des Bus- und Bahnverkehrs bei.

Des Weiteren werden 2050 48 TWh *Schiffsdiesel*, insbesondere im Hochseeschiffverkehr, benötigt. Im Gegensatz zum Binnenverkehr, bei dem eine teilweise Elektrifizierung möglich ist, beruht der Hochseeverkehr annahmegemäß weiterhin vollständig auf dann biogenem Diesel.

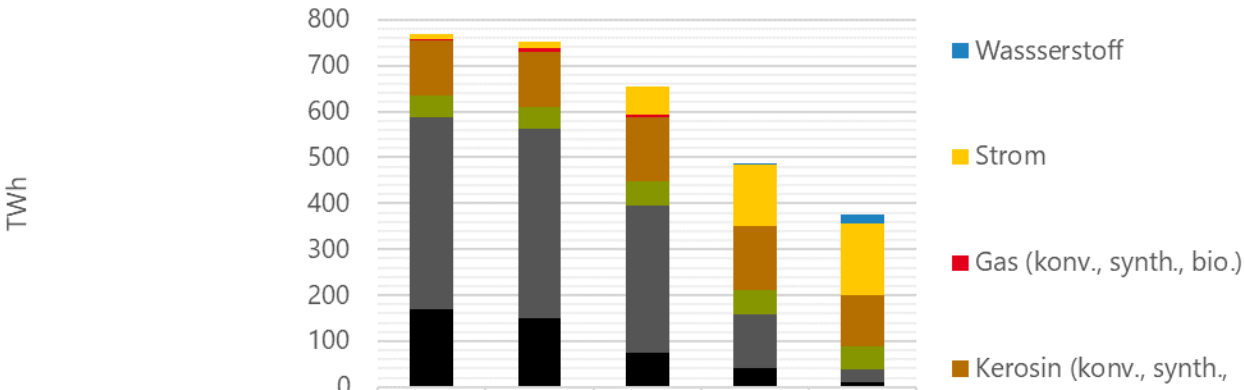
Trotz der Umstellung von inländischen Flügen auf die Nutzung elektrischer Energie werden 2050 weiterhin 113 TWh CO_2-neutrales *Kerosin* benötigt. Dies entspricht 30 % des Endenergiebedarfs.

Gleichzeitig steigt der Bedarf an *elektrischer Energie* bis 2050 auf 155 TWh an. Dies entspricht 41 % des Endenergiebedarfs im Jahr 2050. Strom ist damit der wichtigste Energieträger im Verkehrssektor. Die Hälfte des Strombedarfs entsteht durch (teil-) elektrische Pkw, weitere 37 % werden für Lkw benötigt. Der restliche elektrische Energiebedarf verteilt sich auf Bahn (8 %), Bus (3 %), Flugzeuge (3 %) und Binnenschiffe (< 1 %).

Zusätzlich werden 19 TWh *Wasserstoff*, primär für Pkw, benötigt. Sie werden nahezu ausschließlich im Pkw-Bereich für Fahrzeuge mit hohen Reichweitenanforderungen eingesetzt.

Gas (CNG und LNG) spielt als Kraftstoff im Szenario *TN-Strom* keine Rolle. Die günstigen Bedingungen für elektrische Antriebsalternativen sowie deren hoher Wirkungsgrad lassen den Einsatz zumeist unwirtschaftlich erscheinen.

Abbildung 5: Endenergiebedarf des Verkehrs nach Energieträgern im Szenario *TN-Strom*



	2018 Basisjahr	2020 TN-Strom	2030 TN-Strom	2040 TN-Strom	2050 TN-Strom
Wassserstoff	0	0	0	3	19
Strom	11	15	62	134	155
Gas (konv., synth., bio.)	4	9	5	0	0
Kerosin (konv., synth., bio.)	120	120	139	141	113
Schiffsdiesel (konv., synth.)	47	47	52	52	48
Diesel (konv., synth., bio.)	417	413	321	116	29
Benzin (konv., synth., bio.)	169	149	75	42	10

2.3.2 Detailanalysen

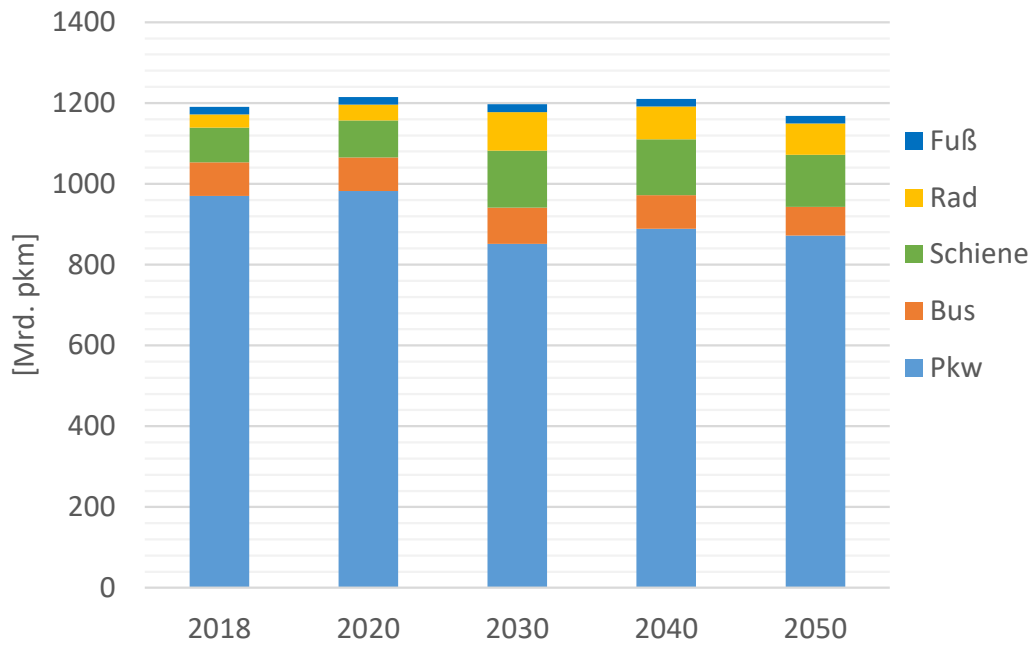
2.3.2.1 Verkehrs- und Fahrleistung

Die mit ASTRA-M abgeschätzten Änderungen des Verkehrsaufkommens, der Verkehrs- und der Fahrleistung werden per Definition für alle drei THG-neutralen Szenarien sowohl für den Personen- als auch für den Güterverkehr als identisch angenommen. Grundlage dafür ist, dass sich das deutlich geänderte

Mobilitätsverhalten in den treibhausgasneutralen Szenarien nur marginal durch die spezifischen Änderungen zwischen den Szenarien beeinflusst wird. Die Änderungen zeigen sich dafür in unterschiedlichen Markthochläufen für alternative Antriebe in den Fahrzeugflotten. Die in den THG-neutralen Szenarien abgeschätzte Entwicklung der Verkehrsnachfrage basiert daher auf den Energieträgerpreisen des Szenarios *TN-Strom*.

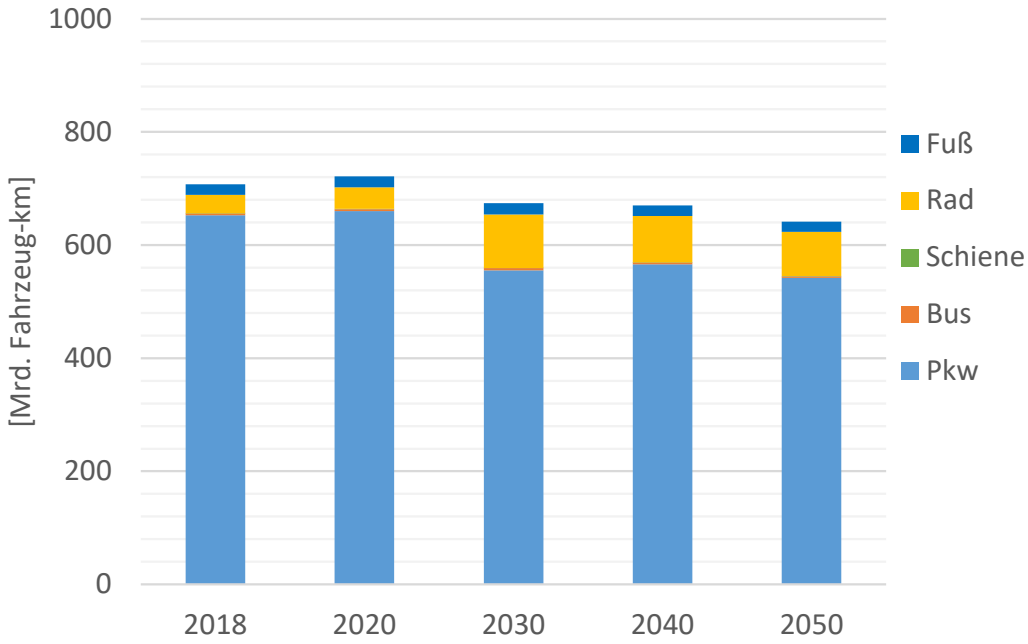
Für die THG-neutralen Szenarien ergeben sich mit den festgelegten Rahmendaten zu Energieträgerpreisen sowie den angenommenen Maßnahmen die folgenden Änderungen bei der Verkehrsleistung und Fahrleistung im Personen- und Güterverkehr. Abbildung 6 und Abbildung 7 zeigen die Entwicklung der Personenverkehrsleistung und der Fahrleistungen differenziert nach Verkehrsmitteln gemessen in Mrd. Personen-km (pkm) bzw. Mrd. Fahrzeug-km in den THG-neutralen Szenarien. Die gesamte Verkehrsleistung des bodengebundenen Verkehrs sinkt durch die angenommenen verkehrspolitischen Maßnahmen, eine verbesserte Verkehrsinfrastruktur, die Entwicklung der Energie- und Kraftstoffpreise und die CO_2-Bepreisung moderat um 2 % bis ins Jahr 2050 gegenüber dem Jahr 2018. Dies bedeutet einen Rückgang der Verkehrsleistung um 47 Mrd. pkm im Jahr 2050 gegenüber 2018. In der Summe werden in den THG neutralen Szenarien im bodengebundenen Personenverkehr damit noch 1.168 Mrd. pkm im Jahr 2050 zurückgelegt. Es zeigt sich eine Verlagerung vom MIV auf die Schiene und den gesamten Umweltverbund. Der Anteil des MIV sinkt anhand der Abschätzungen mit ASTRA-M von 81 % in 2018 auf 74 % in 2050, während die Schiene knapp 4 Prozentpunkte gewinnt. Einen ähnlich starken Zuwachs der Modalanteile zeigt der Radverkehr (ebenfalls 3,8 Prozentpunkte Zuwachs). Die Verkehrsleistung im MIV geht danach um 97,9 Mrd. pkm bis 2050 gegenüber 2018 zurück. Die Verkehrsleistungen im Personenverkehr auf der Schiene steigen um 49 % bzw. um 42,6 Mrd. pkm. Ebenfalls eine Zunahme der Verkehrsleistung lässt sich beim Fahrrad beobachten. Die Verkehrsleistung steigt beim Rad um mehr als das Doppelte auf 78 Mrd. pkm im Jahr 2050 an.

Abbildung 6: Personenverkehrsleistung nach Verkehrsmitteln in den THG neutralen Szenarien



Quelle: Fraunhofer ISI, ASTRA-M (eigene Berechnung)

Abbildung 7: Fahrleistung im Personenverkehr nach Verkehrsmitteln in den THG neutralen Szenarien

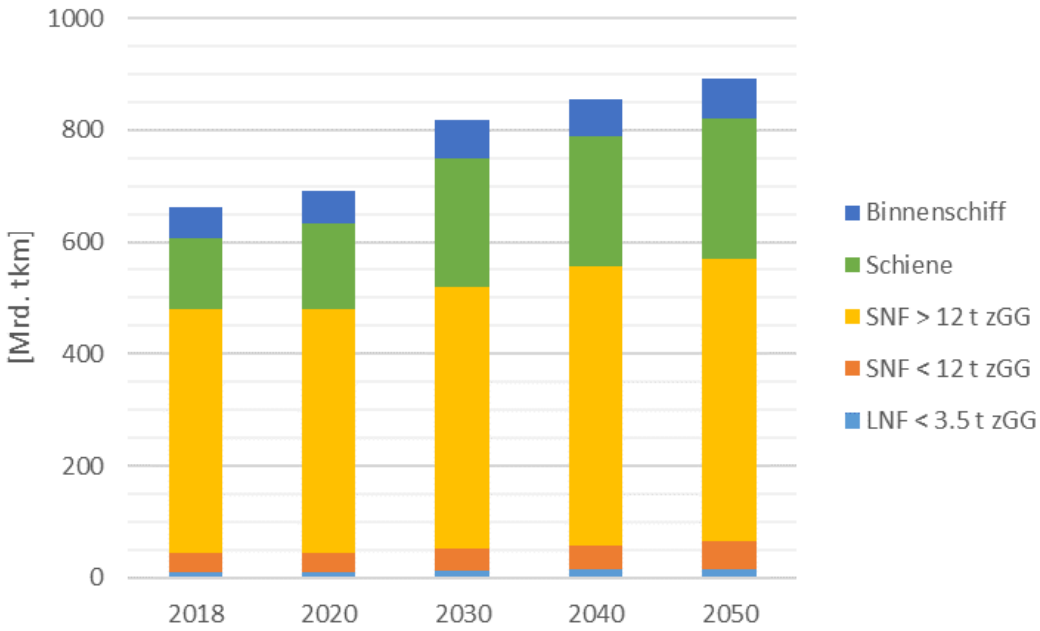


Quelle: Fraunhofer ISI, ASTRA-M (eigene Berechnung)

Die Entwicklung der Verkehrsleistung bzw. der Fahrleistung im Güterverkehr in den THG neutralen Szenarien auf Basis der Berechnungen mit ASTRA-M zeigen Abbildung 8 bzw. Abbildung 9. Es zeigt sich bei den THG-neutralen Szenarien eine deutliche Zunahme der gesamten Verkehrsleistung im Güterverkehr in Höhe von 34,5% in 2050 gegenüber dem Jahr 2018. Ursache dieser deutlichen Steigerung der Verkehrsleistung ist vorrangig das wirtschaftliche Wachstum, aber auch die Veränderung des Modal Splits zu Gunsten der Schiene und dem Binnenschiff, durch den sich die durchschnittlichen Distanzen leicht, aber erkennbar erhöhen. Die Quell-Ziel-Relationen durch die Nutzung der Schiene im Hauptlauf erweisen sich in der Realität weniger direkt als auf der Straße sind und führen dadurch inklusive Vor- und Nachlauf zu längeren Distanzen. Laut den Abschätzzungen mit ASTRA-M steigt die gesamte Verkehrsleistung im Güterverkehr damit in den THG-neutralen Szenarien um ca. 28 Mrd. Tonnen-km auf 890 Mrd. Tonnen-km im Jahr 2050. Die Entwicklung der Verkehrsleistung auf der Schiene wird unter anderem durch den Infrastrukturausbau, eine positive Entwicklung der Kosten der Schiene aber auch durch die Umstellung auf eine CO2 basierte Lkw Maut und die CO2 Bepreisung positiv beeinflusst. Insgesamt bewirken diese Änderungen eine annähernde Verdoppelung der Verkehrsleistung auf ca. 252 Mrd. tkm bis ins Jahr 2050. Gleichzeitig steigt aber auch die Verkehrsleistung vorrangig im schweren Nutzfahrzeugbereich auf der Straße um knapp 15,8 % bzw. 69 Mrd. tkm im Jahr 2050 gegenüber dem Jahr 2018. Durch die Änderungen der Transportpreise und die Annahme einer stärkeren regionalen Zulieferstruktur ergibt sich auf der Straße eine moderate Verschiebung auf die leichten Nutzfahrzeuge kleiner 12 Tonnen zulässigem Gesamtgewicht (zGG). bzw. kleiner 3,5 Tonnen zGG. Die Verkehrsleistung dieser beiden Fahrzeuggruppen steigt um 21 Mrd. tkm und damit um 49 % in 2050 gegenüber dem Jahr 2018.

Bezogen auf den Modal Split bedeuten diese Änderungen eine Zunahme des Modal Anteils der Schiene im Güterverkehr gemessen anhand der Verkehrsleistung in den THG-neutralen Szenarien in Höhe von 10,2 Prozentpunkten von 18,1 % auf 28,3 % im Jahr 2050. Der Modal Anteil der schweren Nutzfahrzeuge über 12 Tonnen zGG sinkt dagegen um 11 Prozentpunkte von 68 % auf 57 % im Jahr 2050 in den treibhausgasneutralen Szenarien.

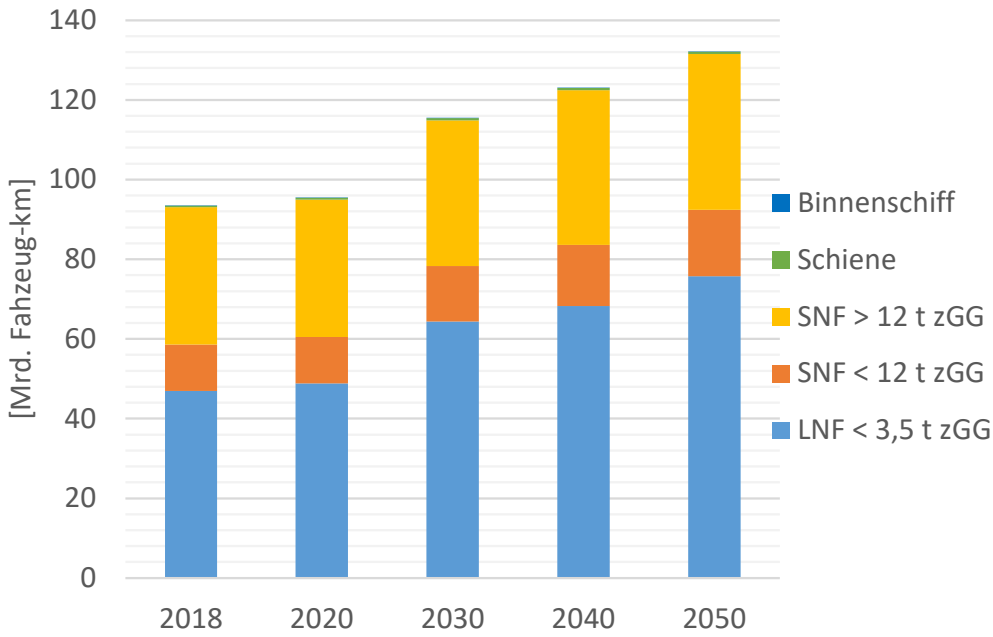
Abbildung 8: Güterverkehrsleistung nach Verkehrsmitteln in den THG-neutralen Szenarien



Quelle: Fraunhofer ISI, ASTRA-M (eigene Berechnung)

Ähnliche Änderungen wie bei der Verkehrsleistung zeigen sich auch bei der Fahrleistung im Güterverkehr. Hier steigen die Fahrleistungen auf der Straße und der Schiene jedoch nicht in gleichem relativen Umfang wie die Verkehrsleistungen, was den Annahmen zur Verbesserung der Beladungsfaktoren speziell auf der Schiene und beim Binnenschiff geschuldet ist. Auch der Rückgang der Verkehrsleistung auf der Straße macht sich durch eine Veränderung der Beladungsfaktoren bemerkbar, weil das vorhandene Fahrzeugmaterial im Bereich der schweren Nutzfahrzeuge nicht mehr so optimal ausgelastet werden kann.

Abbildung 9: Fahrleistung im Güterverkehr nach Verkehrsmitteln in den THG-neutralen Szenarien



Quelle: Fraunhofer ISI, ASTRA-M (eigene Berechnung)

Weitere Verkehrsträger

Im Luftverkehr wird in allen Szenarien ein national und international steigendes Verkehrsaufkommen für Personen und Güter angenommen (siehe Tabelle 7, basierend auf (Pfluger et al. 2017)). Auch im Hochseeverkehr wird ein deutlich steigendes Verkehrsaufkommen angenommen (Pfluger et al. 2017). Eine große Unsicherheit besteht jedoch vor allem im Personenluftverkehr durch mögliche Verhaltensänderungen bedingt durch die COVID-19 Pandemie.

Tabelle 7: Verkehrsaufkommen im Luft- und Hochseeverkehr bis 2050, basierend auf (Pfluger et al. 2017)

Verkehrsaufkommen	2010	2020	2030	2040	2050
Luftverkehr					
Personenverkehr national [Mrd. pkm]	10	13	15	17	16
Personenverkehr international [Mrd. pkm]	183	236	292	340	338
Güterverkehr [Mrd. tkm]	11	13	18	23	25
Hochseeverkehr					
Verkehrsaufkommen [Mrd. tkm]	1.742	2.350	2.970	3.760	4.355

2.3.2.2 Flottenentwicklung

Pkw

Abbildung 10 stellt die Entwicklung des Pkw-Bestands nach Antriebsarten für das Szenario *TN-Strom* dar. Insgesamt geht der Bestand bis 2050 leicht, auf knapp über 40 Millionen Fahrzeuge zurück.

Elektrofahrzeuge profitieren zunächst von der aktuellen Förderpolitik und erreichen 2030 einen Anteil von 26 % am Bestand. Dies entspricht elf Millionen Fahrzeugen. Circa 1/3 der Elektrofahrzeuge sind 2030 PHEV. Langfristig steigt der Anteil der Elektrofahrzeuge im Bestand im Szenario *TN-Strom* auf 88 % an. Dabei handelt es sich 2050 um circa 31 Millionen BEV und 4,2 Millionen PHEV. Im Vergleich zur aktuellen Entwicklung sinkt der Anteil der PHEV damit deutlich ab. Aktuelle Trends im Markt deuten mittel- und langfristig auf deutlich größere Batterien zu kompetitiven Preisen hin. PHEV, die primär von ihrer hohen Reichweite für einzelne Fahrten profitieren, verlieren damit langfristig an Bedeutung.

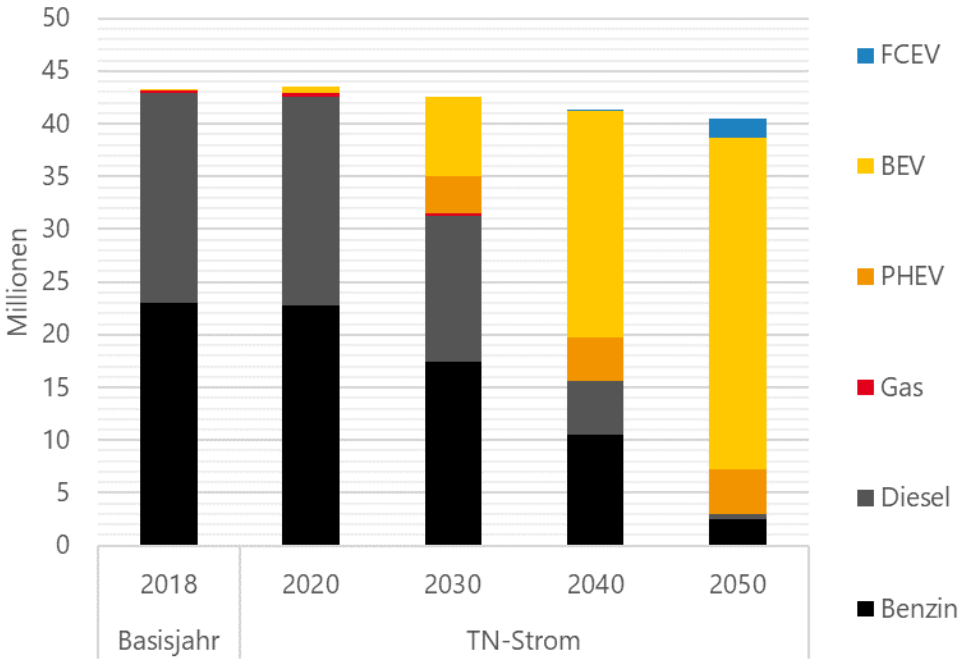
Gasfahrzeuge spielen im Szenario *TN-Strom* keine Rolle. Der aufgrund sinkender Nachfrage fallende Ölpreis bei gleichzeitig konstantem Gaspreis sowie der Wegfall von Steuerbegünstigungen lassen Gasfahrzeuge, auch gegenüber Benzinfahrzeugen, nicht wirtschaftlich erscheinen.

Langfristig spielen Wasserstofffahrzeuge im Szenario *TN-Strom* eine Rolle. Zwar liegt ihr Anteil am Bestand 2050 mit 1,8 Millionen Fahrzeugen bei lediglich 4 %, allerdings werden diese Fahrzeuge primär auf der schwer zu elektrifizierenden Langstrecke mit hohen Fahrleistungen eingesetzt. Sie sind damit eine Ergänzung zu BEV und PHEV. Was nicht untersucht wurde ist, ob bei diesen doch vergleichsweise geringen Stückzahlen sich der Aufbau und Betrieb einer Wasserstoff-Verteil- und Tankstelleninfrastruktur rechnen würde.

Diesel- und Benzinfahrzeuge werden kontinuierlich ersetzt. Ab 2050 werden keine rein verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeuge mehr neu zugelassen. Bereits zuvor kommen die Fahrzeuge primär aufgrund der hohen Betriebskosten bei geringen Fahrleistungen zum Einsatz, bei denen die höheren Fahrzeuginvestitionen für BEV, PHEV und FCEV nicht durch die Einsparungen während der Nutzung kompensiert werden können. Ambitionierte ordnungspolitische Maßnahmen, z.B. ein mittelfristiges Verbot für Verbrennungsmotoren, könnten diese Entwicklung weiter beschleunigen. Um jedoch die Vergleichbarkeit zwischen den Szenarien zu erhalten, wurde auf die Modellierung von Fahrzeugverboten verzichtet. Einfuhrverbote in Städte sowie die Einstellung der Produktion aufgrund sinkender Nachfrage

können die Ersetzung von Benzin- und Dieselfahrzeugen insbesondere ab 2030 zusätzlich beschleunigen.

Abbildung 10: Entwicklung des Pkw-Bestands bis 2050 im Szenario *TN-Strom*



Nutzfahrzeuge

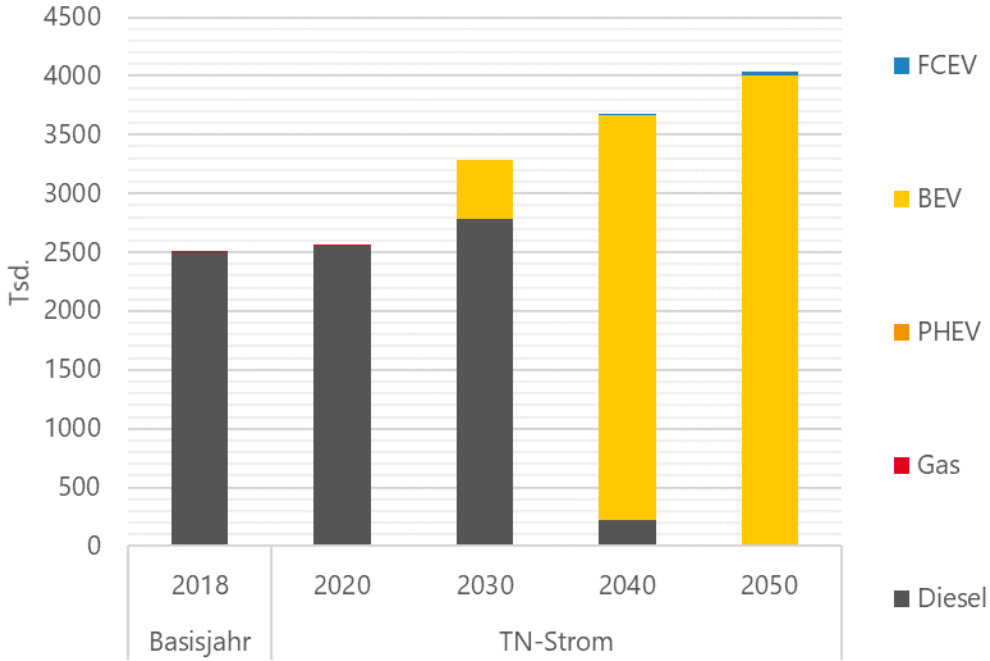
Nutzfahrzeuge werden an dieser Stelle in drei Größenklassen betrachtet:

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

Abbildung 11 stellt die Entwicklung des Bestandes leichter Nutzfahrzeuge dar. Der Anteil von BEV liegt 2030 bei 15 %. Langfristig werden im Segment der leichten Nutzfahrzeuge nahezu ausschließlich BEV eingesetzt. Insbesondere spielen Verbrennungsfahrzeuge 2050 keine Rolle mehr. Generell ermöglicht die im Vergleich zu Pkw hohe Fahrleistung bei niedrigen laufenden Kosten die Amortisation der teureren BEV über die Lebenszeit der Fahrzeuge.

Bei einem Prozent der Fahrzeuge handelt es sich bei um FCEV. Diese sind die wirtschaftlichste Alternative, wenn die Reichweite des BEV nicht ausreicht. Alternativ ist auch hier eine Elektrifizierung mit sehr großen Batterien vorstellbar. Diese ist allerdings aktuell im Modell nicht abgebildet.

Abbildung 11: Entwicklung des Bestandes leichter Nutzfahrzeuge (<3,5 t) bis 2050 im Szenario *TN-Strom*



Die Entwicklung des Bestandes mittlerer Nutzfahrzeuge, dargestellt in Abbildung 12, entspricht im Wesentlichen der der leichten Nutzfahrzeuge. Der Anteil BEV liegt 2030 bei 8 %, 2050 bei 89 %.

FCEV werden wiederum eingesetzt, wenn die Reichweite der BEV nicht ausreichend ist. In dem Szenario werden die ersten FCEV 2035 zugelassen. 2050 erreichen FCEV einen Anteil am Bestand von 8 %.

Abbildung 12: Entwicklung des Bestands mittlerer Nutzfahrzeuge (3,5-12t) bis 2050 im Szenario *TN-Strom*

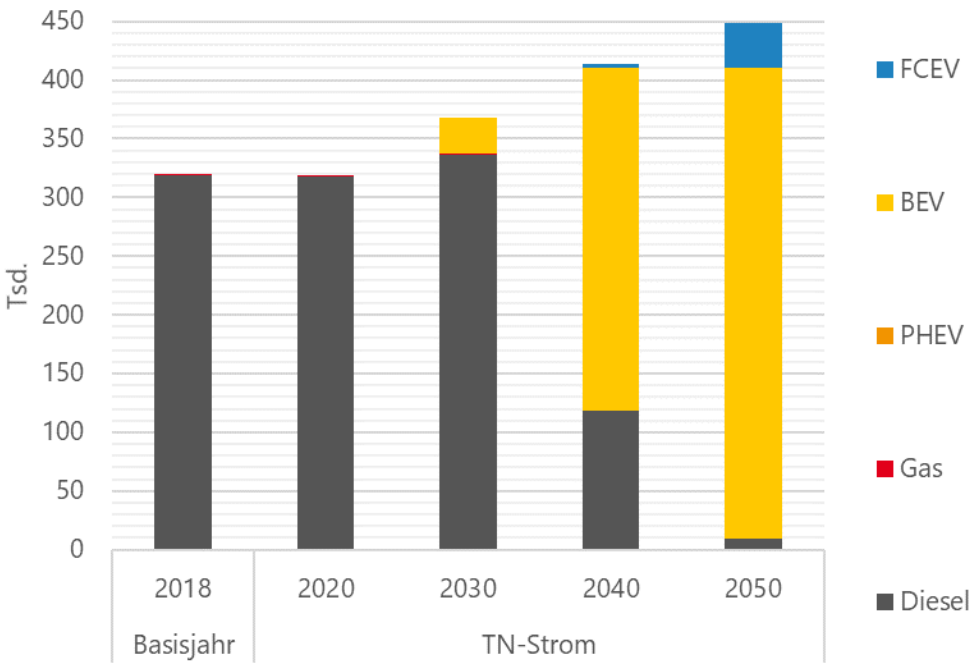
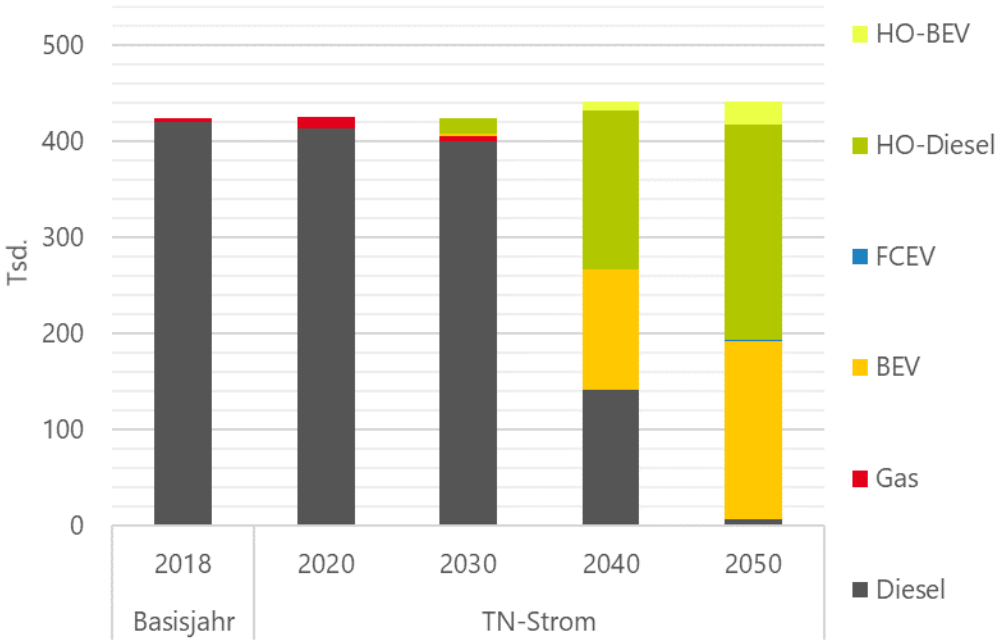


Abbildung 13 stellt die Bestandsentwicklung schwerer Nutzfahrzeuge dar. 2022 werden annahmegemäß die ersten HO-Diesel zugelassen. BEV folgen etwas später, ab 2028. An dieser Stelle wird bislang keine zusätzliche Förderung von BEV berücksichtigt und Infrastruktur als Oberleitung zur Verfügung gestellt. Bei einem gleichzeitigen Aufbau von öffentlicher, stationärer Ladeinfrastruktur (Schnellladen für Lkw) kann der Markthochlauf für BEV auch früher einsetzen beziehungsweise Teile der Oberleitungsfahrzeuge ersetzen. Der Bestand der BEV beträgt 2030 1 %, der Bestand der HO-Diesel 4 % der Fahrzeuge. 2030 liegt der Anteil der BEV an den Neuzulassungen bei schweren Nutzfahrzeugen bei 7,6 %, der von HO-Dieseln bei 17,0 %. Dies ist ausreichend, um die aktuellen EU-Flottengrenzwerte für Neufahrzeuge 2030 zu erfüllen (vgl. z.B. (Breed 2020; Göckeler et al. 2020)). Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass an dieser Stelle davon ausgegangen wird, dass Langstreckenfahrten primär unter der Oberleitung stattfinden. Alternativ kann verstärkt Schnellladeinfrastruktur für schwere Nutzfahrzeuge aufgebaut werden. Dies würde zu einer Verschiebung zwischen HO-Lkw und BEV führen. 2050 dominieren BEV (42 % des Bestandes) und HO-Diesel (51 % des Bestandes) den Bestand schwerer Nutzfahrzeuge. Der HO-BEV erreicht 2050 einen Bestandsanteil von 5 %. Die rein elektrischen Lkw werden dabei primär auf der Kurzstrecke eingesetzt. Der HO-Diesel kann im Szenario *TN-Strom* in hohem Umfang an der Oberleitung eingesetzt werden, da mit 8.000 km circa zwei Drittel des Autobahnnetzes mit Oberleitungen ausgestattet sind.

FCEV spielen in diesem Szenario für schwere Nutzfahrzeuge keine Rolle, ihr Anteil am Bestand liegt 2050 bei unter einem Prozent. Nur in Ausnahmenfällen erscheint ihr Einsatz gegenüber den effizienteren Elektroantrieben wirtschaftlich sinnvoll.

Die Diffusion elektrischer Antriebe bei schweren Nutzfahrzeugen ist stark von der verfügbaren Infrastruktur sowie der Strategie der Hersteller abhängig. Bei ambitionierten politischen Maßnahmen, wie zum Beispiel Grenzwertverschärfungen oder umfangreichen Fördermaßnahmen, ist ein leicht früherer Markthochlauf vorstellbar. Diese Maßnahmen werden im Modell jedoch an dieser Stelle nicht berücksichtigt.

Abbildung 13: Entwicklung des Bestands schwerer Nutzfahrzeuge (> 12t) bis 2050 im Szenario *TN-Strom*



2.3.2.3 Endenergiebedarf nach Verkehrsträgern

Pkw

Der Endenergiebedarf für Pkw sinkt bis 2050 auf 110 TWh ab. Dies entspricht einer Reduktion um 72 % gegenüber dem heutigen Endenergiebedarf. Neben der abnehmenden Fahrleistung ist hierfür insbesondere die konsequente Elektrifizierung in Verbindung mit der hohen Effizienz der Elektromotoren verantwortlich. Abbildung 14 fasst den Endenergiebedarf für Pkw im Szenario *TN-Strom* zusammen.

Der elektrische Endenergiebedarf steigt bist 2030 auf 40 TWh, bis 2050 auf 79 TWh an. Dies entspricht 2050 71 % des Endenergiebedarfs für Pkw.

Die zunehmende Elektrifizierung führt zu einem Rückgang an Benzin- und Dieselkraftstoffen. 2030 liegt ihr Anteil noch bei 225 TWh, was 84 % des Endenergiebedarfs entspricht. 2050 verbleiben im Szenario *TN-Strom* für Pkw 16 TWh Benzin- und Dieselkraftstoffe, die vollständig als biogene beziehungsweise synthetische Kraftstoffe zur Verfügung gestellt werden müssen. Diese Kraftstoffe werden für PHEV sowie Diesel- und Benzin-Pkw mit geringer Fahrleistung benötigt. Mittelfristige Verbote für Verbrennungsmotoren, Einschränkungen der Tankinfrastruktur sowie individuelle Lösungen für Wenigfahrer, zum Beispiel in Form von geteiltem autonomem Fahren, könnten den Bedarf nochmals reduzieren. Dies geht allerdings über die hier durchgeführten Analysen hinaus. Insbesondere wurde bewusst auf Technologieverbote verzichtet, da eine konsistente Kostenschätzung dann nur schwer möglich ist.

Wasserstoff ist in der Perspektive bis 2050 der dritte wesentliche Energieträger im Szenario *TN-Strom* für Pkw. 2050 werden 15 TWh Wasserstoff, primär für Fahrzeuge auf der Langstrecke, eingesetzt. Damit liegt der Anteil von Wasserstoff am Endenergiebedarf der Pkw 2050 bei 14 %.

Abbildung 14: Endenergiebedarf Pkw bis 2050 im Szenario *TN-Strom*

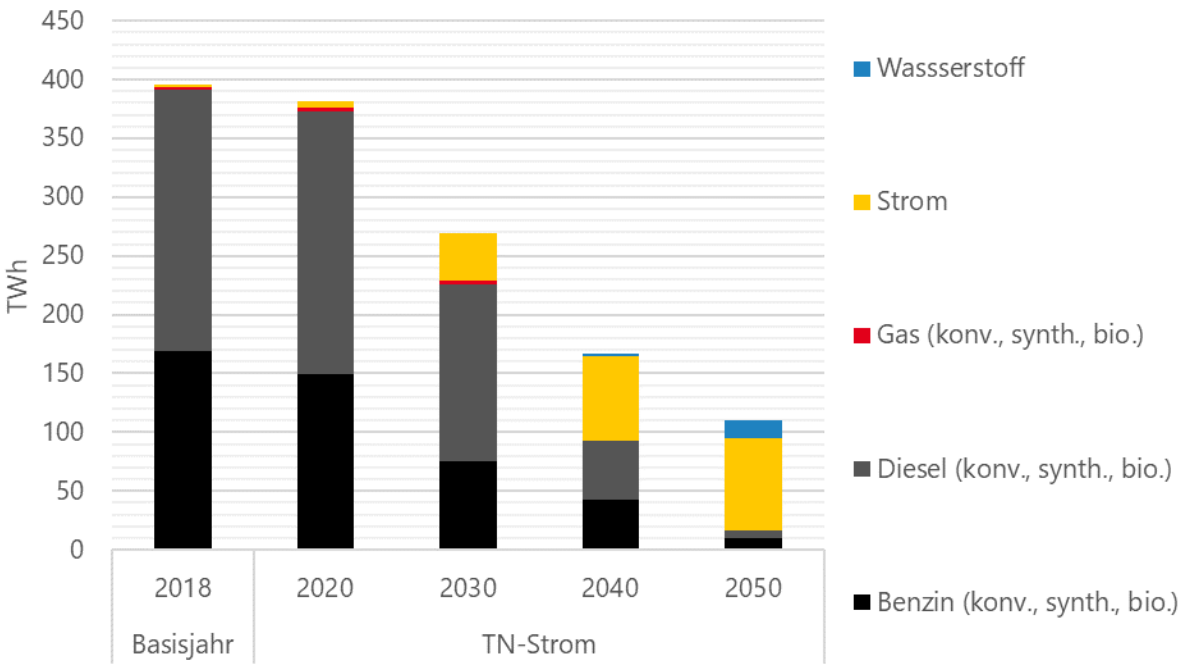


Abbildung 15: Regionaler Endenergiebedarf Pkw im Szenario *TN Strom* 2030 und 2050

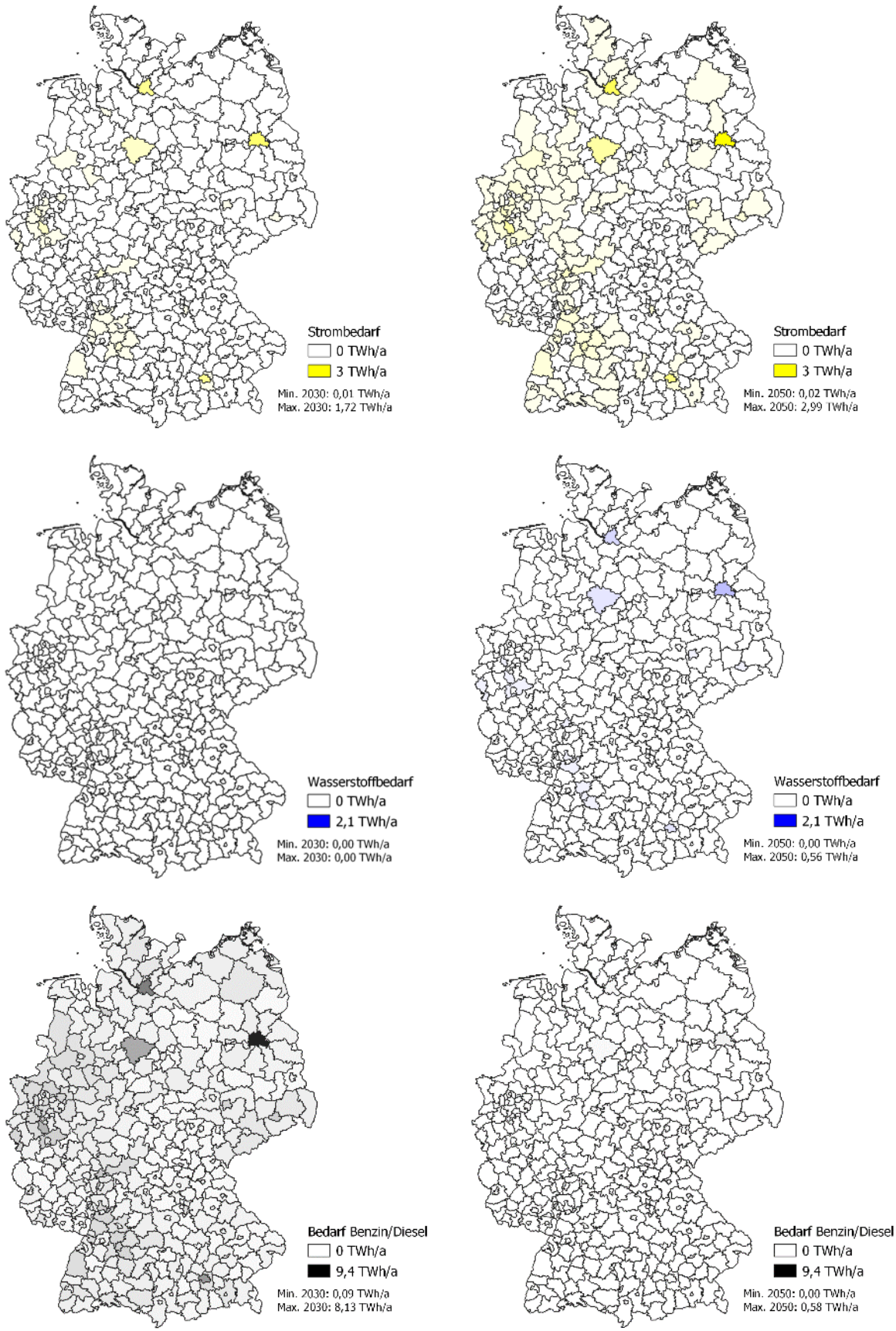


Abbildung 15 stellt die regionale Verteilung des Endenergiebedarfs der Pkw für Strom, Wasserstoff und Benzin bzw. Diesel im Jahr 2030 und 2050 dar. Die Farbskalen sind dabei so gewählt, dass Abbildungen für jeweils einen Kraftstoff im gesamten Bericht vergleichbar sind, Minimal- und Maximalwerte im jeweiligen Szenario und Jahr sind direkt an der Abbildung angegeben. Die Karten zeigen, dass insbesondere Großstädte wie Berlin, Hamburg, München und die Region Rhein-Ruhr absolut gesehen die größten Energiemengen benötigen. Insbesondere der Strombedarf steigt landesweit deutlich an. Unklar bleibt, ob die dargestellte Wasserstoffnachfrage kosteneffizient gedeckt werden kann. Dies ist auch von den Nachfragen in anderen Sektoren abhängig. Eine stärkere Konzentration ist bis zu einem gewissen Grad möglich. Allerdings muss sichergestellt sein, dass FCEV flächendeckend eingesetzt werden können.

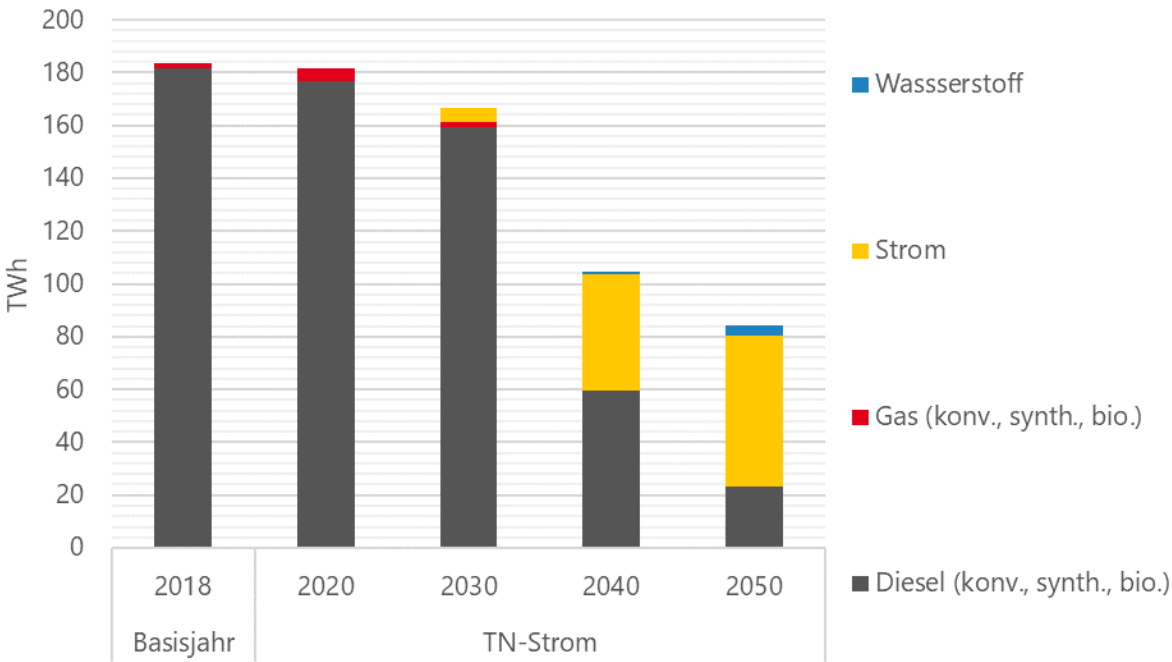
Nutzfahrzeuge

Der Endenergiebedarf für Nutzfahrzeuge reduziert sich bis 2030 um 10 % auf 166 TWh. Die Reduktion ist primär auf Effizienzsteigerungen sowie eine beginnende Elektrifizierung zurückzuführen. Nach 2030 führt die grundlegende Umstellung der Flotte, wie in Abschnitt 2.3.2.2 dargestellt, zu einer deutlichen Minderung des Endenergiebedarfs. 2050 werden für Nutzfahrzeuge 85 TWh Energie benötigt. Damit wird eine Reduktion des Endenergiebedarfs um 54 % erreicht.

Der elektrische Endenergiebedarf für Nutzfahrzeuge steigt im Szenario *TN-Strom* bis 2030 auf 5 TWh, bis 2050 auf 56 TWh an. Gas spielt im Szenario *TN-Strom* langfristig keine Rolle. Der Einsatz von Wasserstoff bleibt auf Nischenanwendungen beschränkt und führt 2050 zu einem Endenergiebedarf von 4 TWh. Dies entspricht einem Anteil von 5 %. Diesel wird im Szenario *TN-Strom* fast vollständig für HO-Lkw benötigt. Der Bedarf an Dieselkraftstoffen sinkt von 182 TWh auf 23 TWh ab. Da die HO-Diesel abseits der Oberleitung mit Diesel betrieben werden, bedeutet die verstärkte Nutzung von Strom gleichzeitig auch einen Restbedarf an Dieselkraftstoff. Ähnlich wie bei Pkw könnte auch hier durch ordnungspolitische Maßnahmen, zum Beispiel dem Verbot von Verbrennungsmotoren, eine weitere Reduktion erfolgen. Eine solche Maßnahme wird an dieser Stelle nicht betrachtet, um eine möglichst vergleichbare Kostenstruktur zwischen den Szenarien zu gewährleisten.

Abbildung 16 fasst den Endenergiebedarf für Nutzfahrzeuge zusammen.

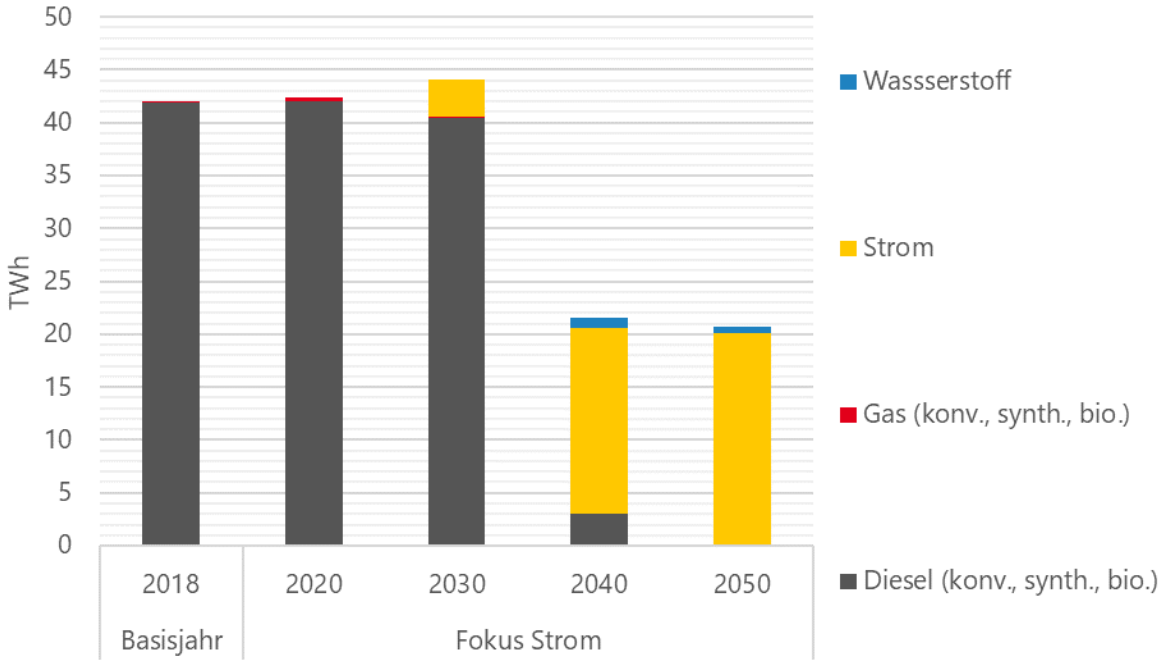
Abbildung 16: Endenergiebedarf Nutzfahrzeuge bis 2050 im Szenario *TN-Strom*



Im Folgenden wird der Endenergiebedarf bei Nutzfahrzeugen in den einzelnen Größenklassen - leicht (<3,5 t), mittel (3,5-12 t), schwer (>12t) - detailliert dargestellt.

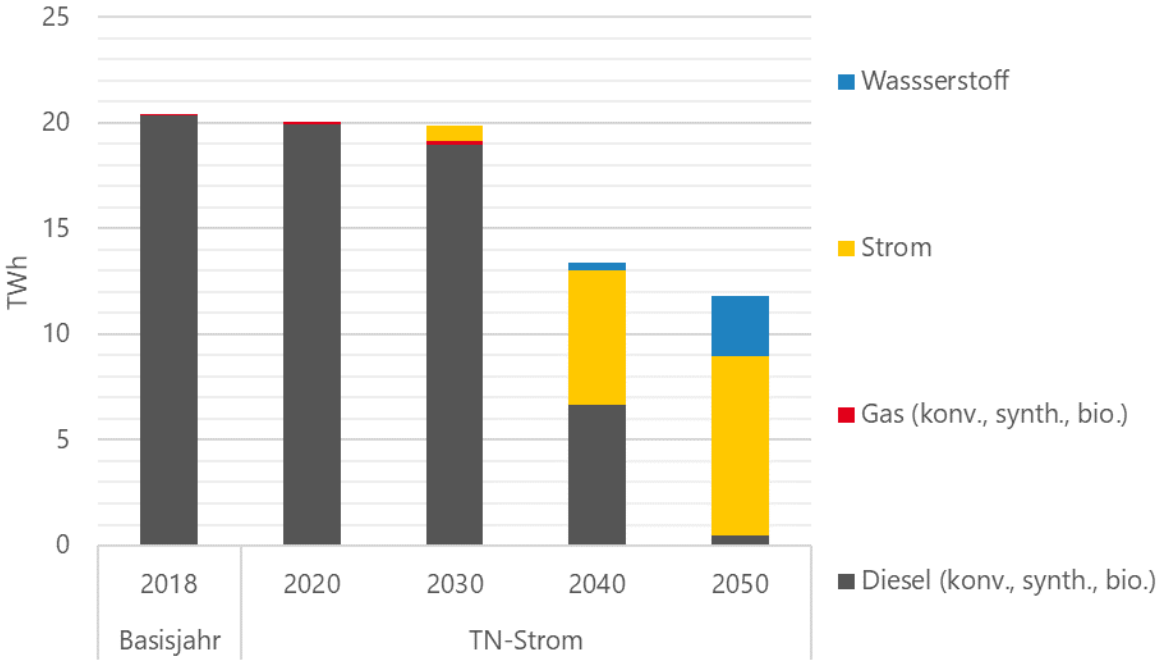
Bei leichten Nutzfahrzeugen steigt der elektrische Endenergiebedarf bis 2030 auf 3,5 TWh an. Bis 2050 erfolgt die (nahezu) vollständige Umstellung auf BEV. Der elektrische Endenergiebedarf steigt dabei auf 20 TWh an. Generell erfolgt für leichte Nutzfahrzeuge in allen Szenarien die nahezu vollständige Umstellung auf Elektromobilität. Ursache hierfür ist die im Vergleich zu Pkw höhere Fahrleistung, die dazu führt, dass sich die höhere Investition durch vergleichsweise niedrige laufende Kosten amortisieren kann. Der langfristige Bedarf an Diesel (0 TWh), Gas (0 TWh) und Wasserstoff (0,6 TWh) ist äußerst gering.

Abbildung 17: Endenergiebedarf leichte Nutzfahrzeuge bis 2050 im Szenario *TN-Strom*



In der Klasse der mittleren Nutzfahrzeuge dominieren langfristig ebenfalls BEV, die Umstellung schreitet jedoch etwas langsamer voran als bei den leichten Nutzfahrzeugen. Im Jahr 2050 stellt elektrische Energie 8,5 TWh und 71 % des Endenergiebedarfs mittlerer Nutzfahrzeuge. Wasserstoff wird für Strecken mit hoher Reichweite eingesetzt und trägt 2050 mit 3 TWh zum Endenergiebedarf bei. Diesel spielt 2050 mit unter 0,5 TWh im Segment der mittleren Nutzfahrzeuge keine Rolle mehr.

Abbildung 18: Endenergiebedarf mittlerer Nutzfahrzeuge bis 2050 im Szenario *TN-Strom*



Im Szenario *TN-Strom* sinkt der Endenergiebedarf für schwere Nutzfahrzeuge auf 52 TWh ab. Dies entspricht einer Einsparung von 57 % gegenüber dem Jahr 2018. Die Reduktion ist insbesondere auf einen deutlichen Ausbau der Oberleitungsinfrastruktur und damit der Nutzung elektrischer Energie, Effizienzsteigerungen sowie der Reduktion des schweren Lkw-Güterverkehrs insgesamt zurückzuführen. Der elektrische Endenergiebedarf liegt 2050 bei 28 TWh. Davon werden 17 TWh durch HO-Diesel verbraucht, 11 TWh durch BEV. Abseits der Oberleitung werden 2050 23 TWh Diesel benötigt, die als biogener Kraftstoff zur Verfügung gestellt werden. Diesel stellt damit 45 % des Endenergiebedarfs schwerer Nutzfahrzeuge 2050. Wasserstoff und LNG spielen im Szenario *TN-Strom* für schwere Nutzfahrzeuge keine Rolle[5].

Wie bereits in Abschnitt 2.3.2.2 beschrieben, ist es vorstellbar, dass die Umstellung hin zu Elektromobilität mit entsprechendem Engagement durch Politik und Wirtschaft bereits früher beginnt. Entsprechende Überlegungen sind jedoch nicht Teil des hier modellierten Markthochlaufs.

[5] Das Modell ALADIN berücksichtigt heute keine Oberleitungsfahrzeuge; die als hybriden Antriebsstrang einen Gasmotor oder eine Brennstoffzelle besitzen. Sollten solche Fahrzeuge zukünftig zur Verfügung stehen, könnte ein Teil der Dieselnachfrage auch als Gas- oder Wasserstoffnachfrage anfallen.

Abbildung 19: Endenergiebedarf schwere Nutzfahrzeuge bis 2050 im Szenario *TN-Strom*

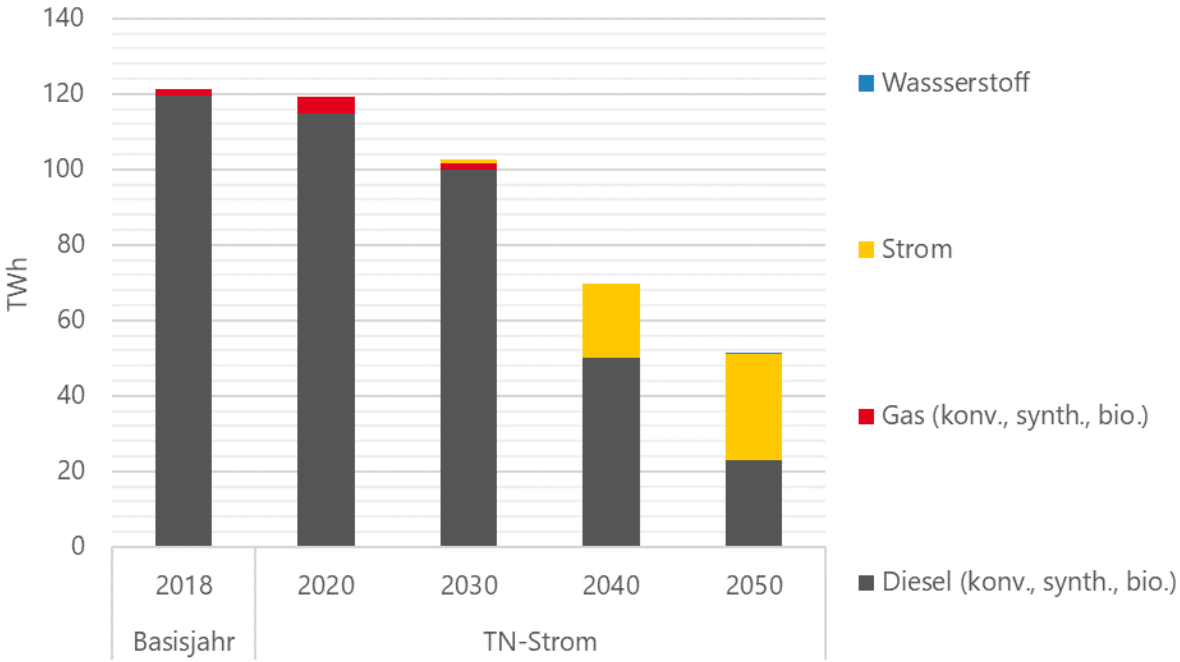
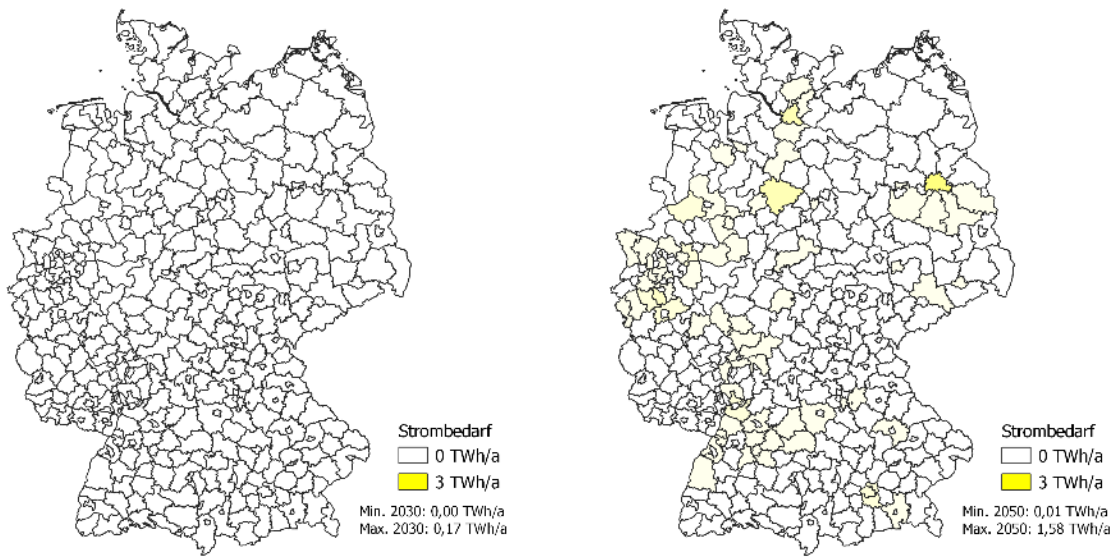
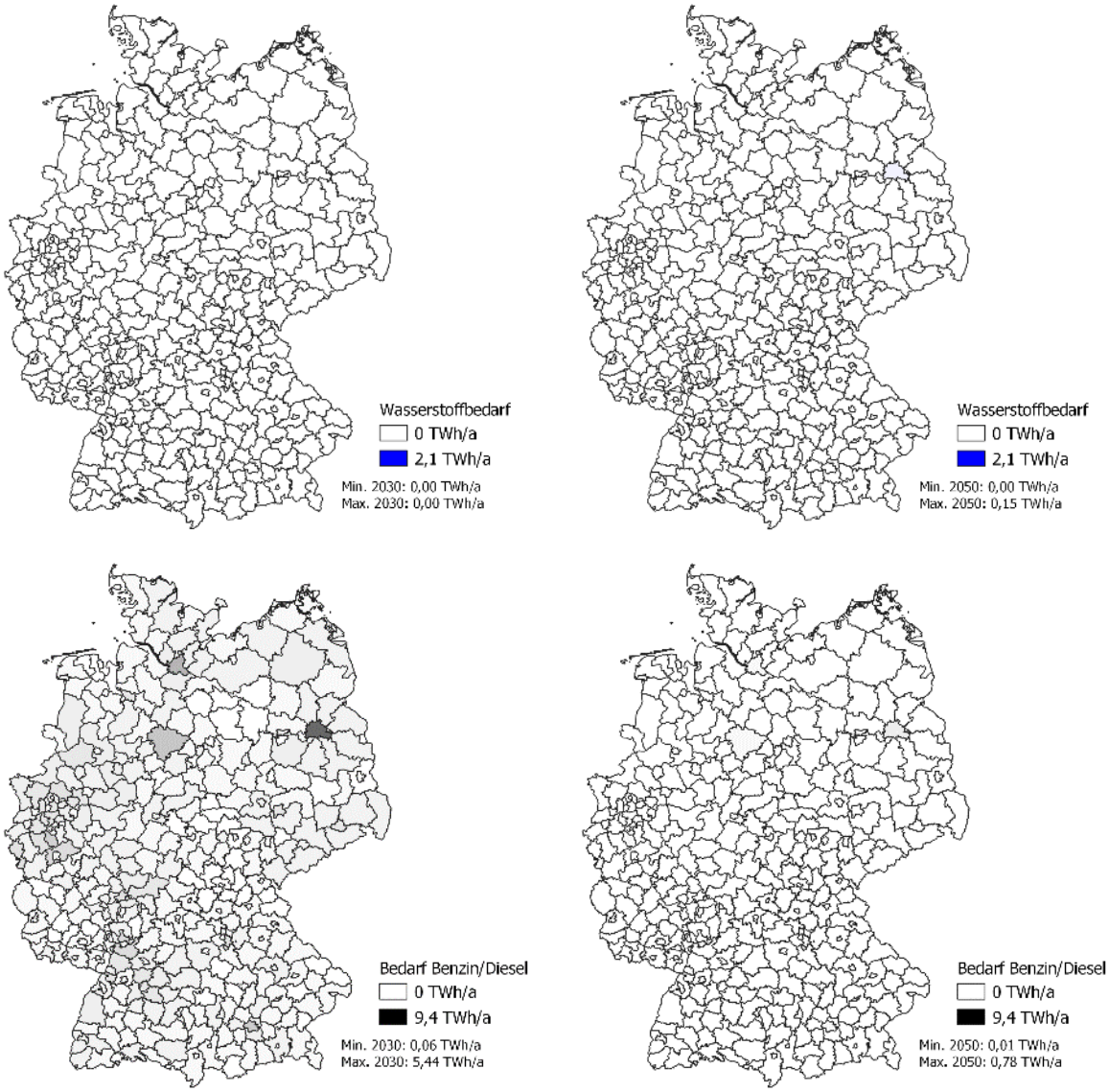


Abbildung 20 stellt die regionale Verteilung des Endenergiebedarfs für Nutzfahrzeuge für Strom, Wasserstoff und Benzin bzw. Diesel im Jahr 2030 und 2050 dar. Die Farbskalen sind dabei so gewählt, dass Abbildungen für jeweils einen Kraftstoff im gesamten Bericht vergleichbar sind, Minimal- und Maximalwerte im jeweiligen Szenario und Jahr sind direkt an der Abbildung angegeben. Auch hier zeigt sich eine absolut gesehen größere Konzentration in dicht besiedelten Gebieten. Gleichzeitig führen jedoch Oberleitungen dazu, dass der Strombedarf des schweren Straßengüterverkehrs zum Teil auch in weniger dicht besiedelten Gebieten anfällt. Betroffen sind hierbei insbesondere Landkreise zwischen Industrieregionen, beispielsweise zwischen Hamburg und Bremen. Auch für Nutzfahrzeuge fällt der regionale Wasserstoffbedarf im Szenario TN-Strom vergleichsweise gering aus, so dass eine Realisierung unklar erscheint.

Abbildung 20: Regionaler Endenergiebedarf Nfz im Szenario *TN Strom* 2030 und 2050





Weitere Verkehrsträger

Im Szenario *TN-Strom* wird angestrebt, alle bis 2050 möglichen Potenziale von Strom im Verkehr auszunutzen. Dies ist in nicht allen Verkehrsträgern zu 100 % möglich, vor allem die nicht landgebundenen Verkehrsträger sind nicht vollständig elektrifizierbar. Folgende Annahmen werden für die Verkehrsträger abseits des Straßenverkehrs getroffen:

- Im Luftverkehr wird angenommen, dass das nationale Luftverkehrsaufkommen bis 2050 mit elektrischen Flugzeugen zu bewältigen ist. Der restliche Luftverkehr wird weiterhin mit Kerosin, dann aus erneuerbaren Quellen, abgewickelt.
- Im Hochseeverkehr werden aufgrund der großen benötigten Reichweiten und Zeiten auf See keine elektrischen Varianten berücksichtigt.
- In der Binnenschifffahrt wird eine Elektrifizierung durch Hybridsysteme und kleinere Schiffe von 20 % bis 2050 angenommen. Für die übrige Binnenschifffahrt kommt langfristig Schiffsdiesel aus erneuerbaren Quellen zum Einsatz.
- Der Schienenverkehr wird bis 2050 zu 100 % elektrisch bewältigt. Für die 10 % der Fahrleistung, die heute abseits der Oberleitung stattfinden, werden in diesem Szenario Batteriezüge eingesetzt (vgl. Pagenkopf et al. (2020)).
- Der Busverkehr wird bis 2050 vollständig auf elektrische Antriebe umgestellt.

Es ergibt sich damit ein Energieverbrauch wie in Tabelle 8 dargestellt. Die Verteilung nach Kraftstoffen findet sich in Tabelle 9. Für die Verkehrsträger ohne Pkw und Nutzfahrzeuge zeigt sich insgesamt ein Rückgang der Endenergienachfrage nach 2030 bei gleichzeitig steigendem Verkehrsaufkommen. Eine Elektrifizierung ist vor allem im Bahn-, Bus- und Binnenschiffsverkehr möglich. Die verbleibenden Mengen an Diesel, Kerosin und LSFO werden in diesem Szenario zu 100 % aus treibhausgasneutralen Kraftstoffen gedeckt.

Tabelle 8: Energieverbrauch aller Verkehrsträger ohne Pkw und Nutzfahrzeuge im Szenario *TN-Strom* unterteilt nach Kraftstoffen und Verkehrsträgern

Energieverbrauch [TWh/a]	2020	2030	2040	2050
Luftverkehr				
Kerosin	120,2	139,1	140,6	112,5
Strom	0,0	1,0	2,3	3,5
Hochseeschiffe				
Schiffsdiesel/LSFO	43,4	48,2	48,8	45,6
Binnenschifffahrt				
LSFO	3,9	4,0	3,5	2,8
Strom	0,0	0,1	0,2	0,4
Busse				
Diesel	9,9	8,3	4,0	0,0
Strom	0,9	1,8	3,0	3,9
Schiene				
Diesel	3,2	3,0	1,4	0,0
Strom	9,1	13,0	12,4	12,1
Gesamtergebnis	190,5	218,2	216,2	180,9

Tabelle 9: Energieverbrauch aller Verkehrsträger ohne Pkw und Nutzfahrzeuge im Szenario *TN-Strom* unterteilt nach Kraftstoffen

Energieverbrauch [TWh/a]	2020	2030	2040	2050
Diesel	13,1	11,2	5,4	0,0
Kerosin	120,2	139,1	140,6	112,5
LSFO	3,9	4,0	3,5	2,8
Schiffsdiesel/LSFO	43,4	48,2	48,8	45,6
Strom	10,0	15,8	18,0	19,9
Gesamtergebnis	**190,5**	**218,2**	**216,2**	**180,9**

2.4 Ergebnisse des Szenarios TN-PtG/PtL

2.4.1 Endenergiebedarf

Abbildung 21 stellt den Endenergiebedarf des Verkehrssektors im Szenario *TN-PtG/PtL* aufgeschlüsselt nach Verkehrsträgern dar. Der gesamte Endenergiebedarf sinkt von 770 TWh auf 452 TWh ab. Dies entspricht einer Reduktion von insgesamt 41 % gegenüber dem Basisjahr 2018. Verglichen mit den anderen beiden treibhausgasneutralen Szenarien weist das Szenario *TN-PtG/PtL* langfristig den höchsten End-

energiebedarf auf. Dies liegt primär am im Vergleich zum Elektromotor oder der Brennstoffzelle geringeren Wirkungsgrad von Verbrennungsmotoren. Die einzelnen Verkehrsträger entwickeln sich dabei unterschiedlich.

Im *Pkw-Verkehr* geht der Endenergiebedarf um 62 % zurück und liegt 2050 bei 151 TWh. Einsparungen werden durch strikte Effizienzsteigerungen inklusive milder Hybridisierung sowie einen weiterhin hohen Anteil von BEV und PHEV erreicht. Im Vergleich zum Szenario *TN-Strom* fällt der Anteil reiner BEV geringer aus, PHEV können ihren Anteil steigern. Auch der leichte Rückgang der Verkehrsleistung in den treibhausgasneutralen Szenarien unterstützt den Rückgang des Endenergiebedarfs. Der Anteil der Pkw am Gesamtendenergiebedarf im Verkehrssektor geht damit von heute über 50 % auf 34 % zurück.

Auch im *Lkw-Verkehr* sind deutliche Reduktionen des Endenergiebedarfs möglich. Allerdings wird davon ausgegangen, dass keine zusätzliche Infrastruktur zur Nutzung elektrischer Energie durch Nutzfahrzeuge aufgebaut wird. Dies reduziert den Einsatz elektrischer schwerer Nutzfahrzeuge auf Fahrzeuge mit vergleichsweise geringer Tagesfahrleistung, bei denen ein Nachladen im heimischen Depot möglich ist. Für leichte und mittlere Nutzfahrzeuge ist Elektrifizierung auch unter den hier gewählten ungünstigen Rahmenbedingungen langfristig in der Regel die kostenoptimale Lösung. Bei schweren Nutzfahrzeugen wird im Vergleich zu den anderen treibhausgasneutralen Szenarien verstärkt auf den Einsatz der vergleichsweise ineffizienten Dieselfahrzeuge gesetzt. Daher liegt der Endenergiebedarf für Nutzfahrzeuge 2050 mit 109 TWh 25 TWh über dem des Szenarios *TN-Strom*. Der Anteil der Lkw am Endenergiebedarf im Verkehr verbleibt konstant bei 24 %.

Im *Busverkehr* wird davon ausgegangen, dass die Hälfte der Fahrleistung 2050, primär lokale Verkehre in Städten, elektrisch erfolgt. Für Langstreckenfahrten wird Diesel aus biogenen oder synthetischen Quellen eingesetzt. Der Endenergiebedarf sinkt von heute 11 TWh auf 6 TWh in 2050 ab.

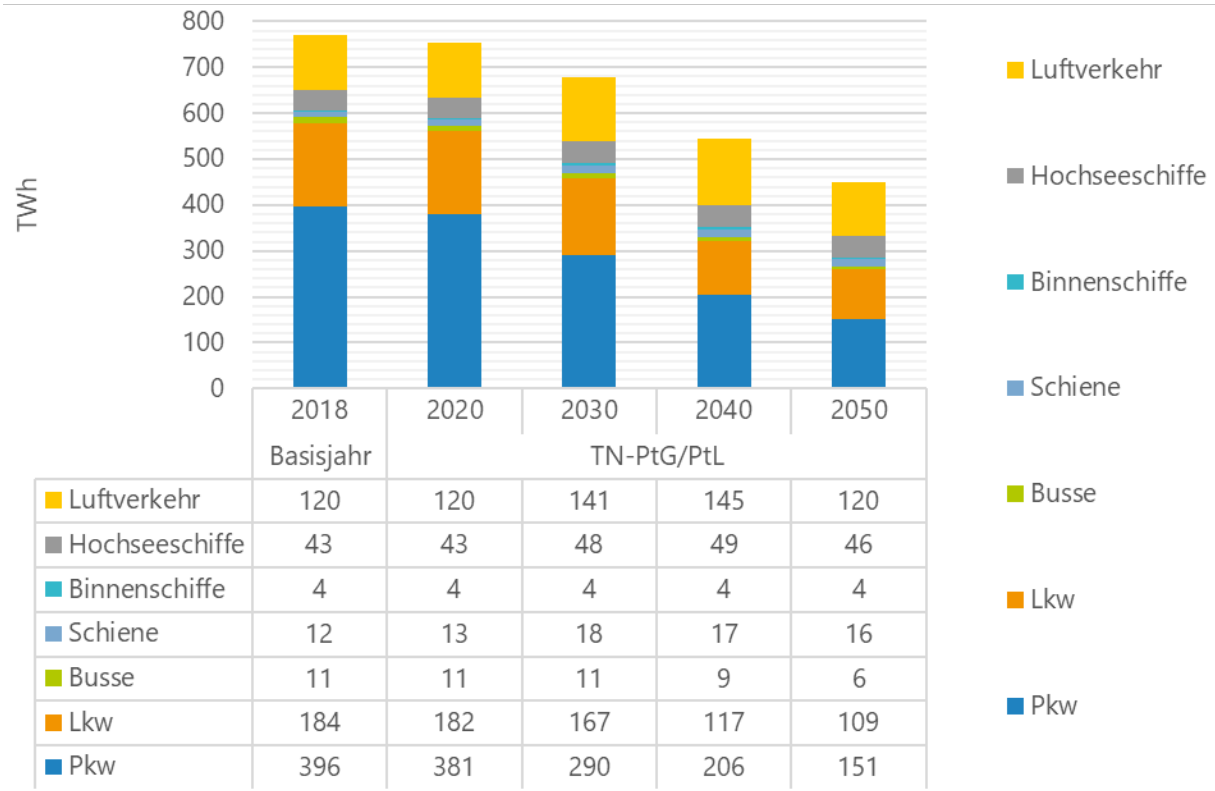
Der *Schienenverkehr* wird, analog zum heutigen Vorgehen, auf Nebenstrecken weiterhin mit Dieselzügen abgewickelt. Aufgrund steigenden Verkehrsaufkommens steigt der Endenergiebedarf bis 2050 von 12 TWh auf 16 TWh an.

Der Endenergiebedarf der *Binnenschifffahrt* verbleibt bei 4 TWh, die ausschließlich in Form von LSFO (Low Sulfur Fuel Oil) zur Verfügung gestellt werden. Der Kraftstoff muss 2050 vollständig aus biogenen beziehungsweise synthetischen Quellen bereitgestellt werden.

Der Endenergiebedarf der *Hochseeschifffahrt* entwickelt sich in allen treibhausgasneutralen Szenarien identisch, da hier davon ausgegangen wird, dass der Kraftstoff, aufgrund der benötigten Reichweiten, weiterhin vollständig als LSFO/Schiffsdiesel zur Verfügung gestellt werden muss. Die Bedeutung der Hochseeschifffahrt nimmt dadurch, trotz deutlicher Effizienzsteigerungen, zu. Sie stellt 2050 10 % des Endenergiebedarfs im Verkehr.

Im *Luftverkehr* kommt im hier beschriebenen Szenario *TN-PtG/PtL* ausschließlich Kerosin zum Einsatz, das langfristig aus biogenen oder synthetischen Quellen zur Verfügung gestellt werden muss. Nach einem Anstieg des Endenergiebedarfs bis 2040, aufgrund höheren Verkehrsaufkommens, sinkt der Wert durch Effizienzsteigerungen bis 2050 auf das heutige Ausgangsniveau von 120 TWh. Der Anteil am Endenergiebedarf im Verkehr steigt dabei von 16 % auf 27 % an.

Abbildung 21: Endenergiebedarf des Verkehrs nach Verkehrsträgern im Szenario *TN-PtG/PtL*



	2018 Basisjahr	2020 TN-PtG/PtL	2030 TN-PtG/PtL	2040 TN-PtG/PtL	2050 TN-PtG/PtL
Luftverkehr	120	120	141	145	120
Hochseeschiffe	43	43	48	49	46
Binnenschiffe	4	4	4	4	4
Schiene	12	13	18	17	16
Busse	11	11	11	9	6
Lkw	184	182	167	117	109
Pkw	396	381	290	206	151

Abbildung 22 stellt den Endenergiebedarf im Szenario *TN-PtG/PtL* gegliedert nach Energieträgern dar. Im Vergleich zu den anderen treibhausgasneutralen Szenarien wird weiterhin ein großer Anteil an Diesel- und Benzinkraftstoffen eingesetzt. Im Verkehrssektor wird im Szenario *TN-PtG/PtL* verstärkt auf den Einsatz flüssiger synthetischer und biogener Kraftstoffe gesetzt. Langfristig ist für die Bereitstellung von flüssigem und gasförmigem Kraftstoff von ähnlichen Kosten auszugehen. Angesichts geringer Kostenunterschiede kann es zu „Pennyswitching" kommen. Das heißt kleine Änderungen in der Kostenstruktur können deutliche Veränderungen in der Zusammensetzung der Fahrzeugflotte auslösen. Aus der Modellperspektive heraus ist die Entscheidung zwischen Gas- und Flüssigkraftstoff daher primär von politischen Rahmenbedingungen, dem Fahrzeug- und Infrastrukturangebot und der Akzeptanz der Nutzer abhängig. Im Szenario *TN-PtG/PtL* wird davon ausgegangen, dass bei ähnlicher Kostenstruktur primär Flüssigkraftstoffe zum Einsatz kommen. Bei diesen handelt es sich um die bekanntere Technologie, was Hürden in der Akzeptanz verhindert. Gleichzeitig ist, insbesondere im Pkw-Bereich, das Angebot am Markt verfügbarer Gasfahrzeuge derzeit rückläufig. Außerdem steht die benötigte Infrastruktur für Flüssigkraftstoffe bereits zur Verfügung. Schließlich spielt insbesondere im Schiffs- und Flugverkehr die höhere Energiedichte von Flüssigkraftstoffen, die zu höheren Reichweiten führt, eine relevante Rolle.

Auch im Szenario *TN-PtG/PtL* werden insbesondere im landgebundenen Verkehr (teil-) elektrische Antriebe eingesetzt. Dies führt dazu, dass der Anteil von *Benzin- und Dieselkraftstoffen* exklusive Schiffskraftstoffe von über 75 % auf 32 % zurückgeht. Im Jahr 2050 verbleiben 144 TWh Benzin- und Dieselkraftstoffe. Der verbleibende Benzinbedarf entsteht dabei durch die Nutzung in Pkw. Er wird hier sowohl in PHEV als auch in verbleibenden reinen Benzinfahrzeugen eingesetzt. Der Dieselbedarf teilt sich langfristig nahezu hälftig auf Diesel-Pkw und Diesel-Nutzfahrzeuge auf. Schienen- und Busverkehr spielen mit insgesamt unter 10 TWh eine untergeordnete Rolle. 2050 handelt es sich hierbei ausschließlich um synthetischen und biogenen Kraftstoff.

Der Bedarf an *Schiffsdiesel* steigt zunächst - aufgrund des steigenden Verkehrsaufkommens - leicht an, kann aber bis 2050 wieder leicht gesenkt werden und liegt dann bei 49 TWh, 2 TWh über dem Ausgangswert. Der Anteil am gesamten Endenergiebedarf des Verkehrs steigt dabei von 6 % auf 11 % an.

Dieser muss 2050 synthetisch oder biogen zur Verfügung gestellt werden. Im Schiffsverkehr wird dabei sowohl im Hochseeschiffsverkehr als auch in der Binnenschifffahrt weiterhin vollständig auf Dieselkraftstoffe gesetzt.

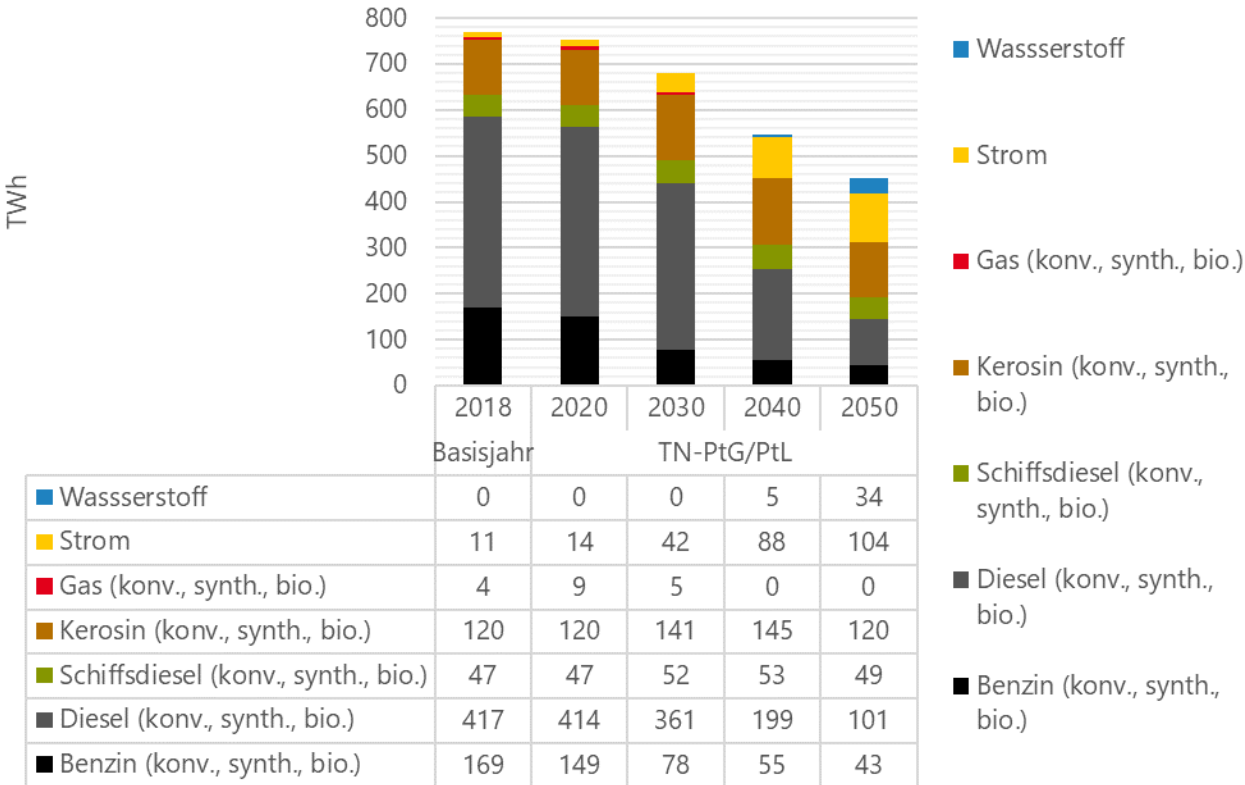
Auch der Bedarf an *Kerosin* steigt zunächst an und fällt anschließend wieder auf das Ausgangsniveau von 120 TWh. Analog zur Schifffahrt wird im Szenario *TN-PtG/PtL* im Luftverkehr weiterhin vollständig von Flüssigkraftstoffen ausgegangen. Damit liegt der Kerosinbedarf 2050 leicht über dem der anderen treibhausgasneutralen Szenarien, da dort für inländische Flüge Strom beziehungsweise Wasserstoff eingesetzt wird. Dabei muss der Kraftstoff 2050 vollständig aus synthetischen oder biogenen Quellen zur Verfügung gestellt werden. Die Bedeutung von Kerosin als Endenergieträger nimmt dabei zu. Der Anteil am gesamten Endenergiebedarf im Verkehr steigt von 16 % auf 27 % an.

Der *elektrische Endenergiebedarf* steigt bis 2050 auf 104 TWh an. Er liegt damit 2050 rund ein Drittel unter dem Bedarf des Szenarios *TN-Strom*. Der Unterschied resultiert primär aus einer geringeren Anzahl an BEV-Pkw sowie dem Verzicht auf eine Ladeinfrastruktur für Nutzfahrzeuge.

Zusätzlich werden 2050 34 TWh *Wasserstoff,* primär im Pkw- und Nutzfahrzeugbereich, benötigt. Wasserstoff ist insbesondere bei hohen Fahrleistungen aufgrund der, im Vergleich zum Verbrennungsmotor, hohen Effizienz konkurrenzfähig.

Wie bereits erläutert, spielt *Gas* (CNG und LNG) im Szenario *TN-PtG/PtL* im Verkehrssektor langfristig keine Rolle. Die sehr ähnliche Preisstruktur von PtG- und PtL-Kraftstoffen führt dazu, dass im Verkehrssektor weiterhin primär Benzin und Diesel eingesetzt werden.

Abbildung 22: Endenergiebedarf des Verkehrs nach Energieträgern im Szenario *TN-PtG/PtL*



	2018	2020	2030	2040	2050
Wassserstoff	0	0	0	5	34
Strom	11	14	42	88	104
Gas (konv., synth., bio.)	4	9	5	0	0
Kerosin (konv., synth., bio.)	120	120	141	145	120
Schiffsdiesel (konv., synth., bio.)	47	47	52	53	49
Diesel (konv., synth., bio.)	417	414	361	199	101
Benzin (konv., synth., bio.)	169	149	78	55	43

2.4.2 Detailanalysen

2.4.2.1 Verkehrs- und Fahrleistung

Die Verkehrs- und Fahrleistung wird in allen treibhausgasneutralen Szenarien als identisch angenommen. Daher entspricht die Verkehrs- und Fahrleistung im Szenario *TN-PtG/PtL* den Beschreibungen des Szenarios *TN-Strom* in Abschnitt 2.3.2.1.

2.4.2.2 Flottenentwicklung

Pkw

Abbildung 23 stellt die Entwicklung des Pkw-Bestands nach Antriebsarten für das Szenario *TN-PtG/PtL* dar. Der Fahrzeugbestand geht auf knapp über 40 Millionen Fahrzeuge zurück. Dieser Rückgang ist in allen treibhausgasneutralen Szenarien identisch.

Der Bestand an Elektrofahrzeugen steigt bis 2030 auf 7,5 Millionen Fahrzeuge, das entspricht 18 % des Bestandes, an. Damit wird das Minimalziel der Bundesregierung von 7 Millionen Elektrofahrzeugen erreicht. Der Bestand an Elektro-Pkw bleibt dabei hinter den treibhausgasneutralen Szenarien *TN-Strom* (11 Millionen EV 2030) und *TN-H_2* (7,9 Millionen EV 2030) zurück. Langfristig steigt der Bestand im Szenario *TN-PtG/PtL* auf 21 Millionen Fahrzeuge an. Der Anteil am Bestand liegt damit 2050 bei 52 %. Der Anteil liegt deutlich unter dem Anteil der Szenarien *TN-Strom* (2050: 88 %) und *TN-H_2* (2050: 62 %). 2030 handelt es sich bei einem Drittel der elektrischen Fahrzeuge um PHEV, bis 2050 steigt der Anteil auf 43 % an. Damit unterscheidet sich das Szenario *TN-PtG/PtL* deutlich von den anderen treibhausgasneutralen Szenarien, in denen Elektrofahrzeuge langfristig primär als reine BEV auftreten. Ursache hierfür sind langfristig vergleichsweise hohe Batteriepreise von 120 €/kWh sowie gleichzeitig langfristig günstigere Kraftstoffpreise für Diesel und Benzin.

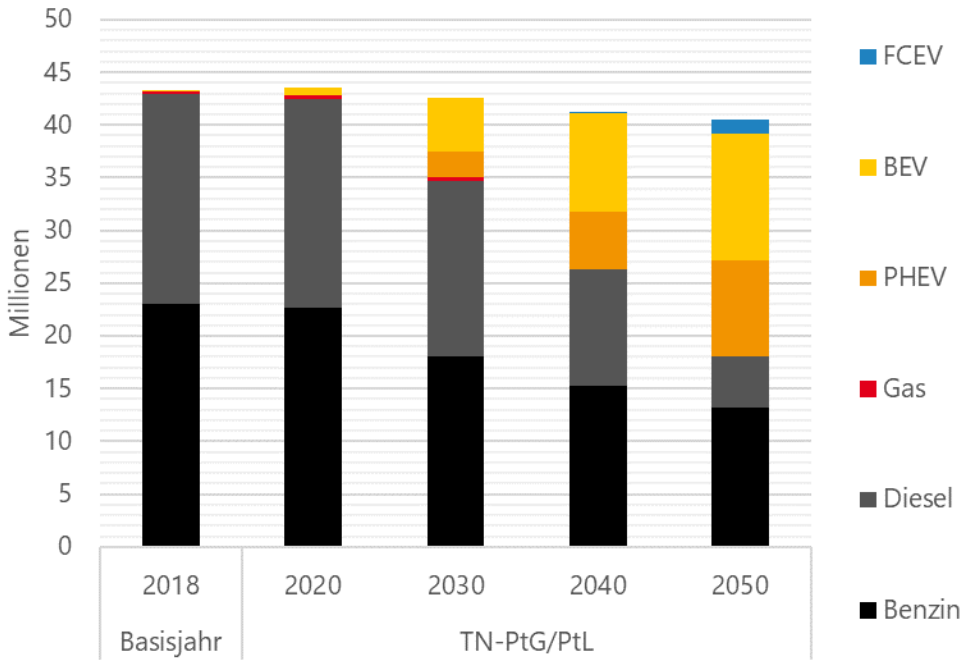
Gasfahrzeuge spielen im Szenario *TN-PtG/PtL* langfristig keine Rolle. In den treibhausgasneutralen Szenarien wird davon ausgegangen, dass der Ölpreis aufgrund sinkender Nachfrage nach konventionellem Erdöl fällt, während der Gaspreis konstant bleibt. Gleichzeitig fallen Steuerbegünstigungen für Gasfahrzeuge zunächst weg. Ab 2030 wird der Kraftstoffpreis zunehmend durch synthetische Kraftstoffe gebildet. Diese besitzen eine Kostenstruktur, bei der PtG und PtL deutlich näher beieinanderliegen als dies heute bei konventionellem Öl und Gas der Fall ist. Subventionen auf synthetische Kraftstoffe gelten ebenfalls sowohl für PtG als auch für PtL. Die Preisstruktur beider Kraftstoffe liegt daher eng beieinander. Auch Nettolistenpreis sowie Verbrauch der Fahrzeuge sind, aufgrund sehr ähnlicher Technologie, langfristig nahezu identisch. Insgesamt sind Diesel- und Benzinfahrzeuge, unter den hier getroffenen Annahmen, etwas wirtschaftlicher als Gasfahrzeuge. Wie bereits in Abschnitt 2.4.1 beschrieben, kann jedoch „Pennyswitching" auftreten. Das heißt, dass eine vergleichsweise kleine Änderung der Inputparameter das Verhältnis von Benzin- und Dieselfahrzeugen zu Gasfahrzeugen deutlich verändern kann.

Wasserstofffahrzeuge spielen, analog zum Szenario *TN-Strom*, eine Rolle in Nischenanwendungen. 2050 liegt ihr Anteil im Szenario *TN-PtG/PtL* bei 3 % beziehungsweise 1,3 Millionen Fahrzeugen. Die Fahrzeuge werden primär auf schwer zu elektrifizierenden Langstrecken mit hohen Fahrleistungen eingesetzt, für die die Batteriereichweite ohne Nachladen nicht ausreichend ist, und stehen im hier vorgestellten Szenario in Konkurrenz zu PHEV und Dieselfahrzeugen. Unklar ist, ob bei vergleichsweise geringen Stückzahlen ein entsprechendes Fahrzeugangebot zur Verfügung steht.

Trotz der im Vergleich zu den anderen treibhausgasneutralen Szenarien günstigen Rahmenbedingungen für Diesel- und Benzinfahrzeuge werden diese auch im Szenario *TN-PtG/PtL* kontinuierlich ersetzt. ihr Bestand liegt 2030 bei 34,7 Millionen Fahrzeugen. Ursache ist der Anstieg der Preise für Benzin- und Dieselkraftstoffe, der auf die Einführung biogener und synthetischer Kraftstoffe sowie die Bepreisung von CO_2 zurückzuführen ist. 2050 verbleiben 18 Millionen Diesel- und Benzinfahrzeuge im Bestand. dies

entspricht einem Anteil von 45 %. Die Fahrzeuge kommen primär bei geringen Fahrleistungen zum Einsatz, bei denen die höheren Investitionen für BEV, PHEV und FCEV nicht durch die Einsparungen während der Nutzung kompensiert werden können. Im Szenario *TN-PtG/PtL* werden 2050 knapp 1,2 Millionen Benzin- oder Dieselfahrzeuge neu zugelassen. Der Anteil an den Neuzulassungen ist dabei ab 2045 nahezu konstant und liegt bei 40 %.

Abbildung 23: Entwicklung des Pkw-Bestands bis 2050 im Szenario *TN-PtG/PtL*



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).

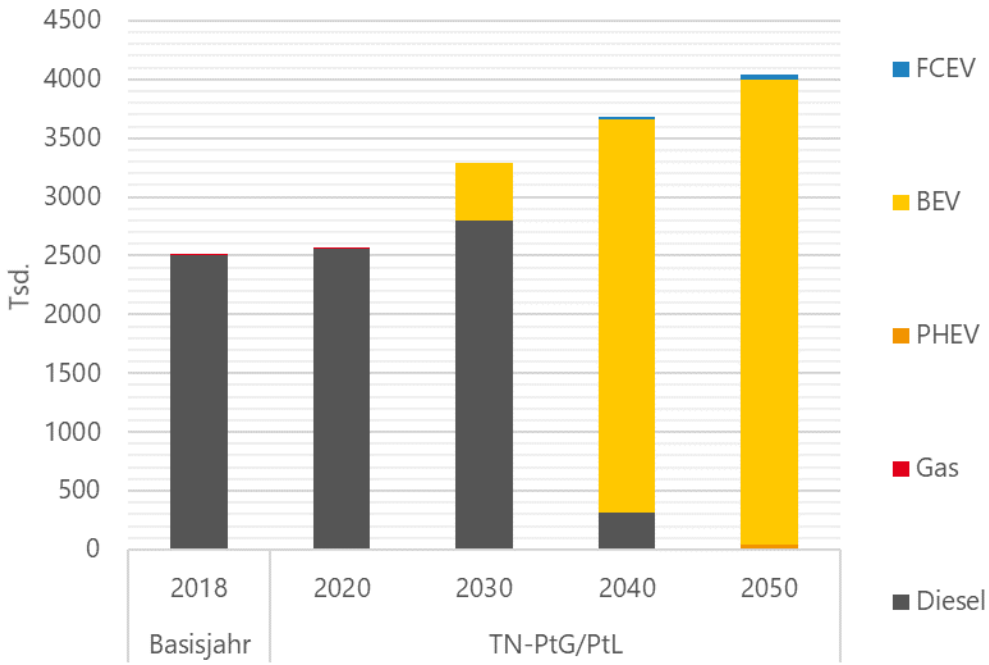
Abbildung 24 stellt die Entwicklung des Bestandes leichter Nutzfahrzeuge im Szenario *TN-PtG/PtL* dar. Der Anteil von BEV liegt 2030 bei knapp 15 % und ist damit nahezu identisch zu den Szenarien *TN-Strom* und *TN-H_2*. Der minimale Unterschied von 13.000 Fahrzeugen resultiert aus Modellperspektive aus höheren Batteriepreisen, wird aber durch zunächst im Vergleich zu den Szenarien *TN-Strom* und *TN-H_2* stärker steigende Dieselkosten, die aufgrund der Beimischung von PtL auftreten, teilweise kompensiert. Die im Vergleich zum Pkw hohe Fahrleistung führt dazu, dass die laufenden Kosten - insbesondere die Kraftstoffkosten - höheren Einfluss auf die Gesamtkosten des Fahrzeuges haben. Die niedrigen laufenden Kosten des BEV können damit die höhere Investition in die Batterie kompensieren. Bis 2050 steigt der Anteil der BEV auf 98 % an. Trotz vergleichsweise günstiger Rahmenbedingungen für Dieselfahrzeuge spielen Verbrenner damit keine Rolle mehr.

Wie im Szenario *TN-Strom* handelt es sich bei knapp 1 % der Fahrzeuge 2050 um FCEV. Diese sind die wirtschaftlichste Alternative, wenn die Reichweite des BEV nicht ausreicht. Alternativ ist auch hier eine Elektrifizierung mit sehr großen Batterien vorstellbar, diese ist allerdings aktuell im Modell nicht abgebildet.

Eine Ausgestaltung des Szenarios *TN-PtG/PtL* als Szenario mit bevorzugtem Einsatz von synthetischen Kraftstoffen war für leichte Nutzfahrzeuge damit nicht möglich. Die hohe Effizienz des Elektromotors bei

gleichzeitig hoher, aber typischerweise regelmäßiger Fahrleistung ermöglicht mittelfristig, auch unter für Elektromobilität ungünstigen Randbedingungen, den kosteneffizienten Einsatz von BEV.

Abbildung 24: Entwicklung des Bestands leichter Nutzfahrzeuge (<3,5 t) bis 2050 im Szenario *TN-PtG/PtL*



Die Entwicklung des Bestands mittlere Nutzfahrzeuge im Szenario *TN-PtG/PtL*, dargestellt in Abbildung 25, entspricht im Wesentlichen der der leichten Nutzfahrzeuge. Der Anteil BEV liegt 2030 bei 9 %, 2050 bei 88 %. Die Entwicklung entspricht damit der des Szenarios *TN-Strom*.

FCEV werden wiederum bei nicht ausreichender Reichweite der BEV eingesetzt und erreichen 2050 einen Anteil am Bestand von knapp 9 %.

Wie bereits bei den leichten Nutzfahrzeugen ist eine Ausdifferenzierung des Szenarios *TN-PtG/PtL* mit verstärktem Einsatz von synthetischen Kraftstoffen nicht möglich. Die Kombination aus hoher Fahrleistung und effizienterem Motor führt auch bei mittleren Nutzfahrzeugen dazu, dass BEV langfristig die kosteneffizienteste Lösung darstellen.

Abbildung 25: Entwicklung des Bestands mittlerer Nutzfahrzeuge (3,5-12 t) bis 2050 im Szenario *TN-PtG/PtL*

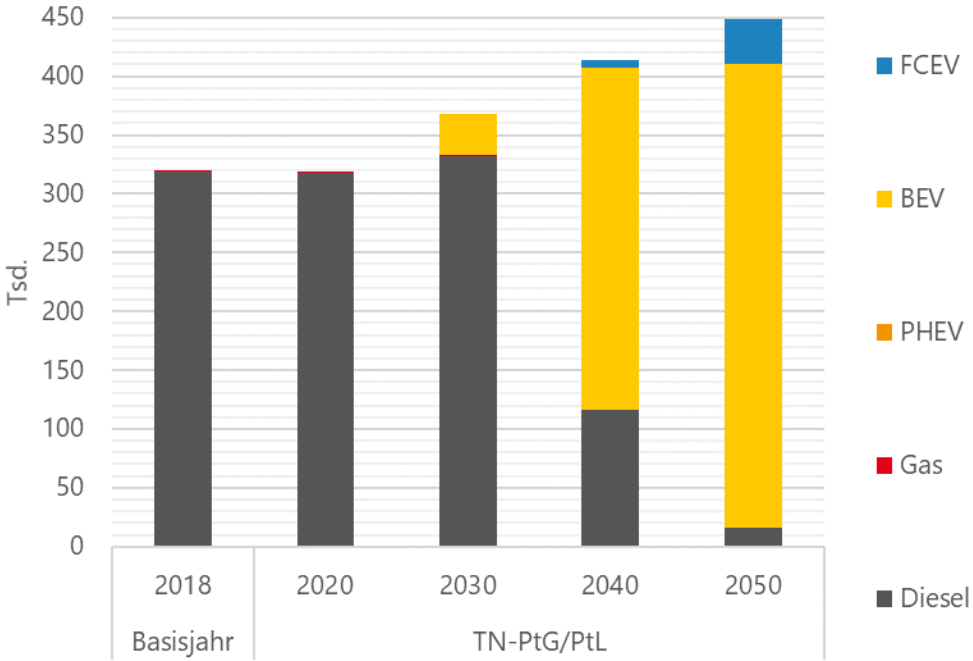


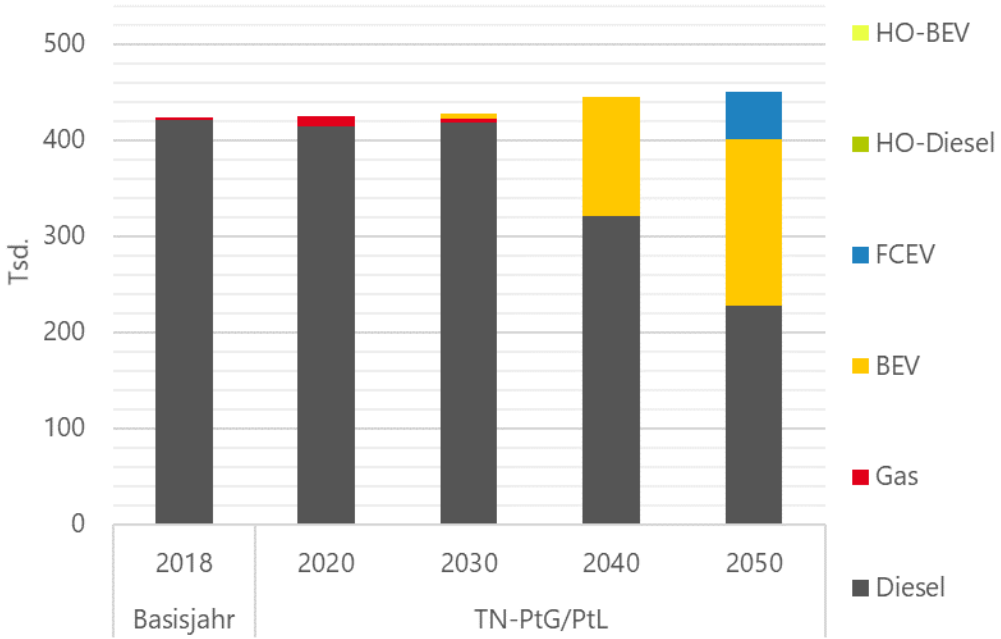
Abbildung 26 stellt die Bestandsentwicklung schwerer Nutzfahrzeuge im Szenario *TN-PtG/PtL* dar. Im Gegensatz zum Szenario *TN-Strom* steht im Szenario *TN-PtG/PtL* keine Option zum öffentlichen Nachladen, z.B. in Form von Oberleitungen, zur Verfügung. Der Anteil der BEV am Bestand beträgt 2030 1 %, die Neuzulassungen 10 %. Die aktuell für 2030 geltenden Flottengrenzwerte für Neufahrzeuge in der Europäischen Union könnten damit voraussichtlich knapp eingehalten werden (Breed 2020). Damit liegen die Neuzulassungen von BEV zunächst 2,5 Prozentpunkte über denen des Szenarios *TN-Strom*, was auf den Wegfall der Oberleitungsfahrzeuge als Konkurrenzoption zurückzuführen ist. Werden diese ebenfalls berücksichtigt, so ist der Elektrifizierungsanteil im Szenario *TN-Strom* mit knapp 25 % der Neuzulassungen und 5 % des Bestandes deutlich höher. Bis 2050 steigt der Anteil der BEV am Bestand auf 38 % an. Damit liegt er über dem Niveau des Szenarios *TN-H_2* (34 %), allerdings leicht unter dem Niveau des Szenarios *TN-Strom* (42 %). Generell ist der BEV, sofern die Reichweite es zulässt, auch bei schweren Nutzfahrzeugen im Szenario *TN-PtG/PtL* oft die kostengünstigste Option.

Dieselfahrzeuge werden 2050 weiterhin eingesetzt, wenn die Reichweite batterieelektrischer Fahrzeuge nicht ausreichend ist. 2050 verbleiben daher im Szenario *TN-PtG/PtL* 50 % der Fahrzeuge als Dieselfahrzeuge und kommen primär auf der Langstrecke zum Einsatz. Der Kraftstoff wird dabei 2050 vollständig aus synthetischen oder biogenen Quellen zur Verfügung gestellt.

Außerdem besteht die Flotte der schweren Nutzfahrzeuge 2050 im Szenario *TN-PtG/PtL* zu 11 % aus FCEV. Sie werden bei sehr hohen Fahrleistungen eingesetzt, wenn die höhere Effizienz und der im Vergleich zum Diesel geringere Verbrauch die vergleichsweise hohe Investition amortisieren können.

Zusammengefasst kommen im Szenario *TN-PtG/PtL* synthetische Kraftstoffe insbesondere dann zum Einsatz, wenn die tägliche Fahrleistung zu hoch für den Einsatz von BEV ist und die Fahrleistung gleichzeitig zu gering ist, um die hohen Investitionen eines FCEV zu amortisieren. Wie bereits erläutert, kann es bei leichten Verschiebungen in der Kostenstruktur von PtG und PtL zu einer Verschiebung zwischen Diesel- und Gasfahrzeugen kommen.

Abbildung 26: Entwicklung des Bestands schwerer Nutzfahrzeuge (>12 t) bis 2050 im Szenario *TN-PtG/PtL*



2.4.2.3 Endenergiebedarf nach Verkehrsträgern

Pkw

Der Endenergiebedarf für Pkw sinkt im Szenario *TN-PtG/PtL* bis 2050 auf 151 TWh ab. Dies entspricht einer Reduktion um 62 % gegenüber dem heutigen Endenergiebedarf. Im Vergleich der treibhausgasneutralen Szenarien ist der Endenergiebedarf 2050 im Szenario *TN-PtG/PtL* am höchsten. Gegenüber den anderen treibhausgasneutralen Szenarien steigern die verbleibenden Benzin- und Dieselfahrzeuge den Endenergiebedarf. Die verbleibenden Reduktionen sind im Wesentlichen auf Effizienzsteigerungen sowie den Einsatz von BEV und PHEV zurückzuführen. Abbildung 27 fasst den Endenergiebedarf für Pkw im Szenario *TN-PtG/PtL* zusammen.

Der elektrische Endenergiebedarf für Pkw steigt bis 2030 auf 25 TWh, bis 2050 auf 51 TWh an. Damit entspricht der elektrische Endenergiebedarf im Szenario *TN-PtG/PtL* 2030 weitestgehend dem des Szenarios *TN-H_2*. Die Entwicklung der Elektrifizierung verläuft hier bis 2030 ähnlich. Demgegenüber weist das Szenario *TN-Strom* mit 40 TWh einen deutlich höheren Bedarf auf. In der Perspektive bis 2050 benötigt das Szenario *TN-PtG/PtL* drei TWh elektrische Endenergie weniger als das Szenario *TN-H_2*. PHEV, die im Szenario *TN-PtG/PtL* verstärkt eingesetzt werden, werden primär elektrisch gefahren und tragen deutlich zum Strombedarf bei.

Benzin- und Dieselkraftstoffe gehen auch um Szenario *TN-PtG/PtL* deutlich zurück. Im Jahr 2050 verbleiben 82 TWh. Dies entspricht einem Anteil von 54 % des gesamten Endenergiebedarfs von Pkw. 2050 muss der Bedarf im Szenario *TN-PtG/PtL* vollständig aus biogenen oder synthetischen Quellen gedeckt werden. Benzin- und Dieselkraftstoffe werden dabei zum einen für PHEV zur Reichweitenverlängerung, zum anderen für Wenigfahrer in Benzin- und Diesel-Pkw eingesetzt.

Als dritter Energieträger für Pkw im Szenario *TN-PtG/PtL* kommt in der Perspektive bis 2050 Wasserstoff zum Einsatz. 2050 werden 18 TWh für Fahrzeuge mit hoher Fahrleistung eingesetzt. Der Bedarf liegt damit in einer ähnlichen Größenordnung wie im Szenario *TN-Strom*.

Gas spielt im Szenario *TN-PtG/PtL* für Pkw langfristig keine Rolle. Wie in Abschnitt 2.4.1 erläutert, steht Gas in Konkurrenz zu Benzin und Diesel.

Abbildung 27: Endenergiebedarf Pkw bis 2050 im Szenario *TN-PtG/PtL*

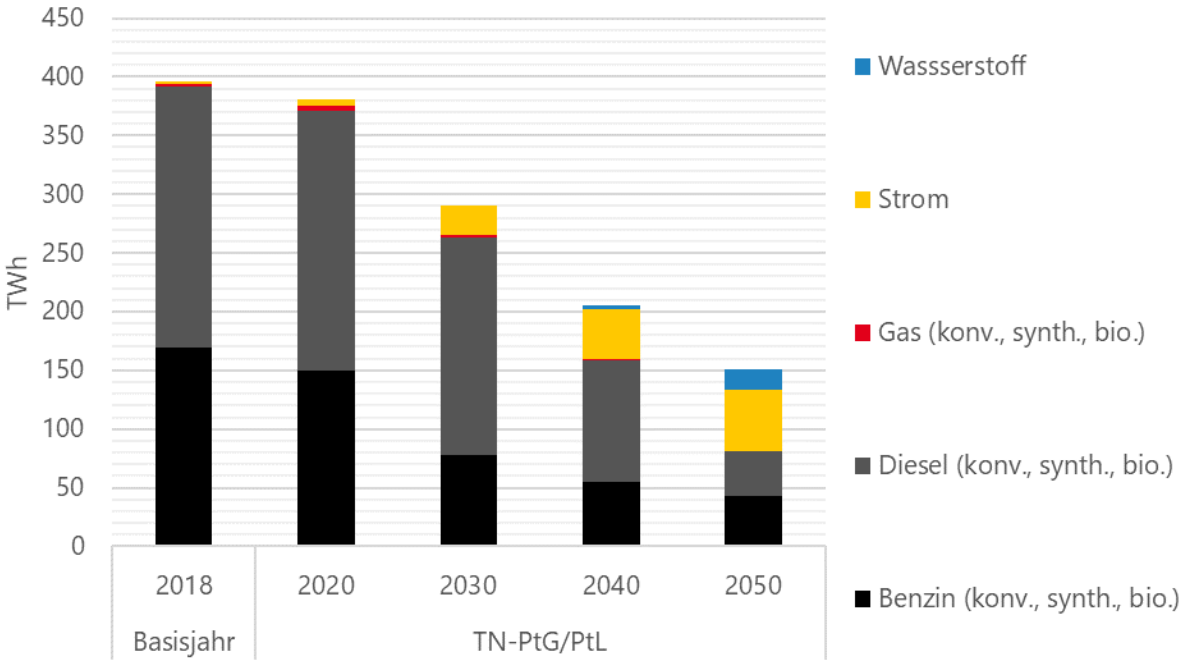
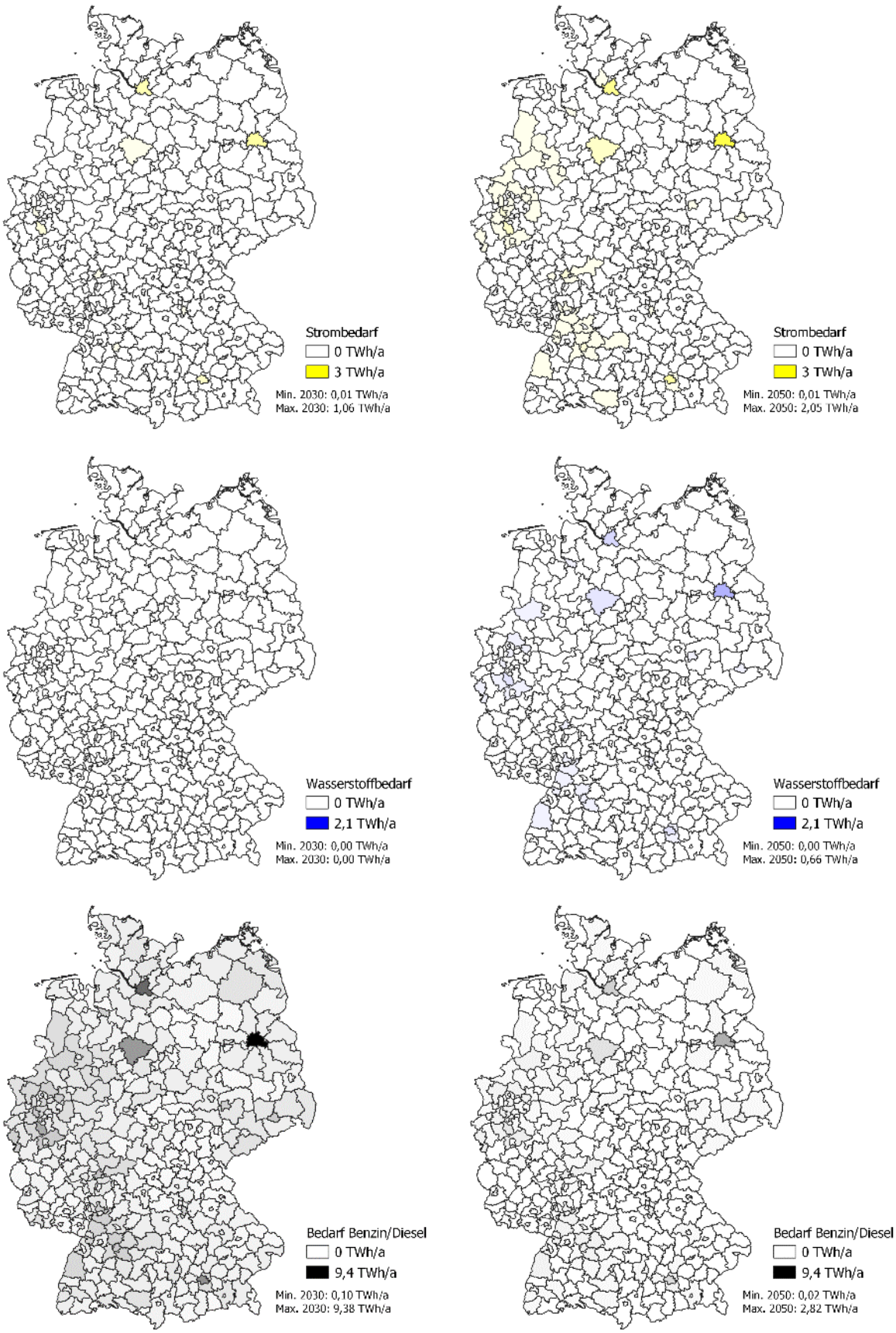


Abbildung 28 stellt die regionale Verteilung des Endenergiebedarfs der Pkw für Strom, Wasserstoff und Benzin bzw. Diesel im Jahr 2030 und 2050 dar. Die Farbskalen sind dabei so gewählt, dass Abbildungen für jeweils einen Kraftstoff im gesamten Bericht vergleichbar sind, Minimal- und Maximalwerte im jeweiligen Szenario und Jahr sind direkt an der Abbildung angegeben. Ähnlich wie im Szenario *TN-Strom* steigt auch hier der elektrische Endenergiebedarf absolut gesehen vor allem in Großstädten an und Wasserstoff wird wiederum in geringen Mengen nachgefragt. Auch 2050 verbleibt in Berlin, als größer Nachfrager, ein Bedarf nach biogenem oder synthetischem Kraftstoff von knapp 3 TWh jährlich.

Abbildung 28: Regionaler Endenergiebedarf Pkw im Szenario *TN-PtG/PtL* 2030 und 2050



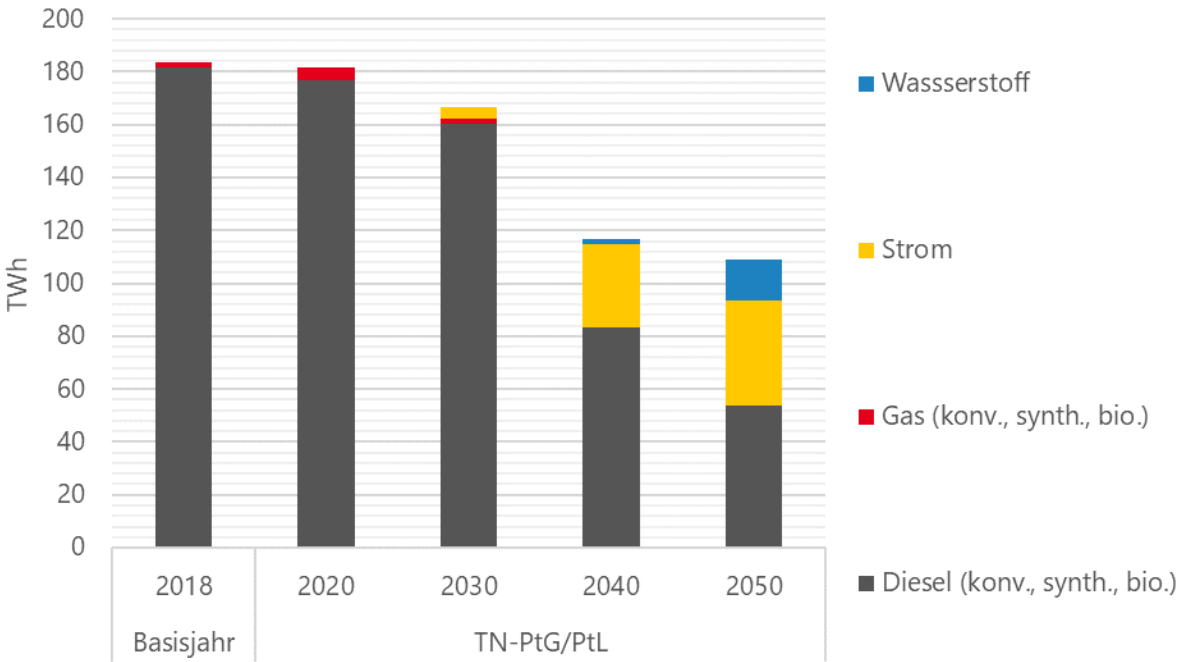
Nutzfahrzeuge

Der Endenergiebedarf für Nutzfahrzeuge im Szenario *TN-PtG/PtL* reduziert sich bis 2030 um 9 % auf 167 TWh. Die Entwicklung ist dabei in allen treibhausgasneutralen Szenarien weitestgehend identisch. Reduktionen werden durch Effizienzsteigerungen sowie die beginnende Elektrifizierung ermöglicht. Gleichzeitig reduziert das Verkehrswachstum jedoch die absolute Reduktion. Nach 2030 kommt es auch im Szenario *TN-PtG/PtL* zunehmend zur Elektrifizierung der Fahrzeuge. Eine Infrastruktur, die die Elektrifizierung schwerer Nutzfahrzeuge auf der Langstrecke ermöglichen würde, steht jedoch nicht zur Verfügung. Daher sinkt der Endenergiebedarf für Nutzfahrzeuge bis 2050 deutlich geringer als im Szenario *TN-Strom* und erreicht 2050 109 TWh. Dies entspricht einer Reduktion von 41 % gegenüber dem heutigen Niveau.

Der elektrische Endenergiebedarf steigt im Szenario *TN-PtG/PtL* bis 2030 auf knapp 5 TWh, bis 2050 auf 40 TWh an. Gas spielt im Szenario *TN-PtG/PtL* langfristig zunächst keine Rolle, kann jedoch, wie in Abschnitt 2.4.1 erläutert, bei leichten Veränderungen der Rahmenannahmen, Teile des Dieselbedarfs ersetzen. Wasserstoff ist langfristig mit 16 TWh bedeutender als im Szenario *TN-Strom* und wird vor allem als Alternative für Fahrzeuge mit hoher Fahrleistung genutzt. Der Anteil am Endenergiebedarf für Nutzfahrzeuge liegt 2050 bei 14 %. Der Bedarf nach Dieselkraftstoffen sinkt im Szenario *TN-PtG/PtL* deutlich geringer ab als in den anderen treibhausgasneutralen Szenarien und erreicht 2050 54 TWh. Dies entspricht der Hälfte der für Nutzfahrzeuge benötigten Endenergie. Ursache hierfür ist im Wesentlichen der Bedarf der schweren Nutzfahrzeuge im Langstreckeneinsatz.

Abbildung 29 fasst den Endenergiebedarf für Nutzfahrzeuge im Szenario *TN-PtG/PtL* zusammen.

Abbildung 29: Endenergiebedarf Nutzfahrzeuge bis 2050 im Szenario *TN-PtG/PtL*



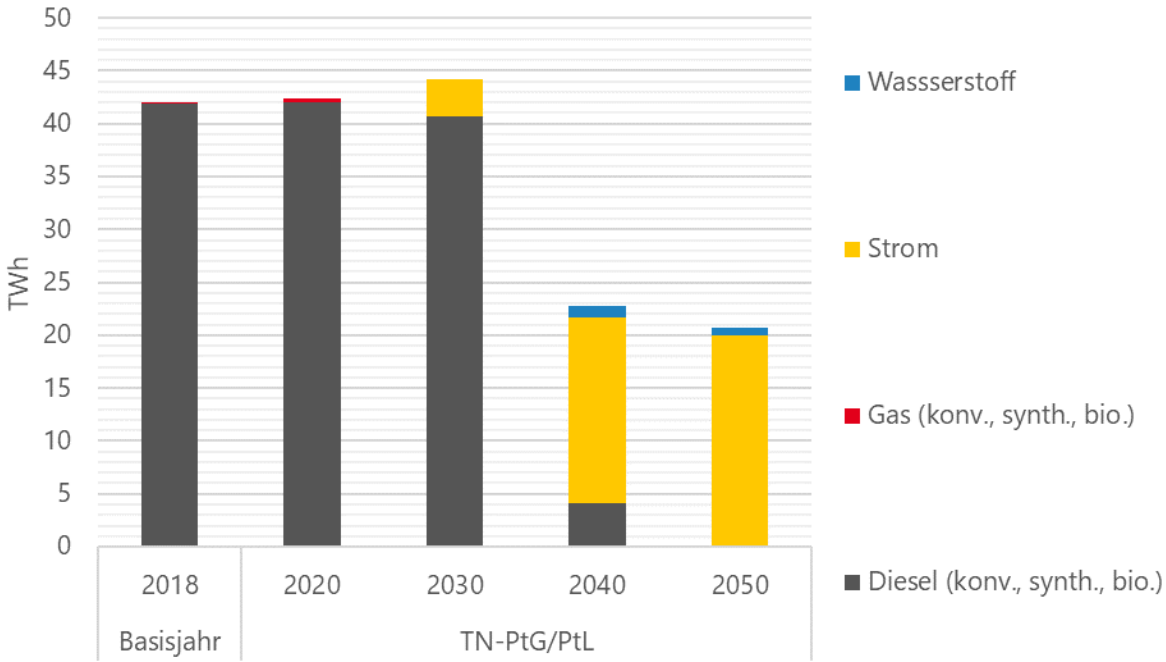
Im Folgenden wird der Endenergiebedarf bei Nutzfahrzeugen in den einzelnen Größenklassen - leicht (<3,5 t), mittel (3,5-12 t), schwer (>12t) - detailliert dargestellt.

Bei leichten Nutzfahrzeugen steigt der elektrische Endenergiebedarf bis 2030 auf 3,5 TWh, bis 2050 auf 20 TWh an. Die Entwicklung ist dabei in allen Szenarien identisch. Es erfolgt die nahezu vollständige Umstellung auf Elektromobilität. Ursache hierfür ist die im Vergleich zu Pkw höhere Fahrleistung, die dazu führt, dass sich die höhere Investition durch vergleichsweise niedrige laufende Kosten amortisieren

kann. Der langfristige Bedarf an Diesel (0,1 TWh), Gas (0 TWh) und Wasserstoff (0,7 TWh) ist äußerst gering.

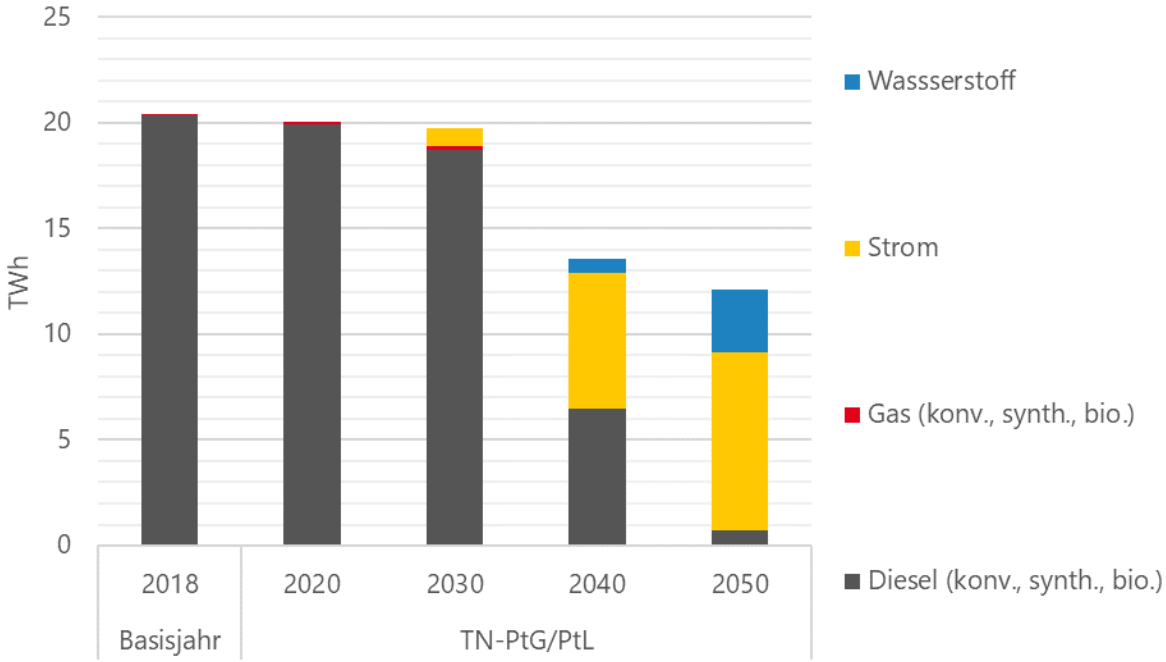
Die Entwicklung des Endenergiebedarfs für leichte Nutzfahrzeuge im Szenario *TN-PtG/PtL* ist in Abbildung 30 dargestellt.

Abbildung 30: Endenergiebedarf leichte Nutzfahrzeuge bis 2050 im Szenario *TN-PtG/PtL*



In der Klasse der mittleren Nutzfahrzeuge dominieren langfristig ebenfalls BEV. Im Jahr 2050 setzt sich der Endenergiebedarf mittlerer Nutzfahrzeuge im Szenario *TN-PtG/PtL* zu 79 % (9 TWh) aus Strom, 6 % (1 TWh) aus Diesel und 25 % (3 TWh) aus Wasserstoff zusammen.

Abbildung 31: Endenergiebedarf mittlerer Nutzfahrzeuge bis 2050 im Szenario *TN-PtG/PtL*



Im Szenario *TN-PtG/PtL* sinkt der Endenergiebedarf für schwere Nutzfahrzeuge bis 2050 auf 76 TWh ab. Dies entspricht einer Reduktion von 37 %. Der Endenergiebedarf 2050 liegt damit 6 TWh über dem des Szenarios *TN-H_2* und 25 TWh über dem des Szenarios *TN-Strom*. Der elektrische Endenergiebedarf liegt 2050 bei 11 TWh. Dies entspricht dem Verbrauch der reinen BEV im Szenario *TN-Strom*. Der Einsatz elektrischer Energie ist damit auch unter ungünstigen Bedingungen die wirtschaftlichste Alternative, sofern die Reichweite der Fahrzeuge ausreichend ist. Der Dieselbedarf stellt 2050 mit 69 % (53 TWh) den größten Teil des Endenergiebedarfs für schwere Nutzfahrzeuge im Szenario *TN-PtG/PtL*. Er muss 2050 vollständig aus biogenen oder synthetischen Quellen zur Verfügung gestellt werden. Außerdem werden 2050 12 TWh Wasserstoff benötigt, die bei Fahrzeugen mit hoher Fahrleistung zum Einsatz kommen.

Das Szenario *TN-PtG/PtL* beschreibt eine Welt, in der für schwere Nutzfahrzeuge langfristig weiterhin auf Verbrennungsmotoren gesetzt wird. Ein politisches Engagement, das die Einführung alternativer Antriebe weiter nach vorne verschieben könnte, ist daher in dem Szenario nicht unterstellt. Vielmehr wird davon ausgegangen, dass beispielsweise zukünftige CO_2-Flottengrenzwerte den Einsatz synthetischer und biogener Kraftstoffe als CO_2-Minderungsmaßnahme berücksichtigen.

Abbildung 32: Endenergiebedarf schwere Nutzfahrzeuge bis 2050 im Szenario *TN-PtG/PtL*

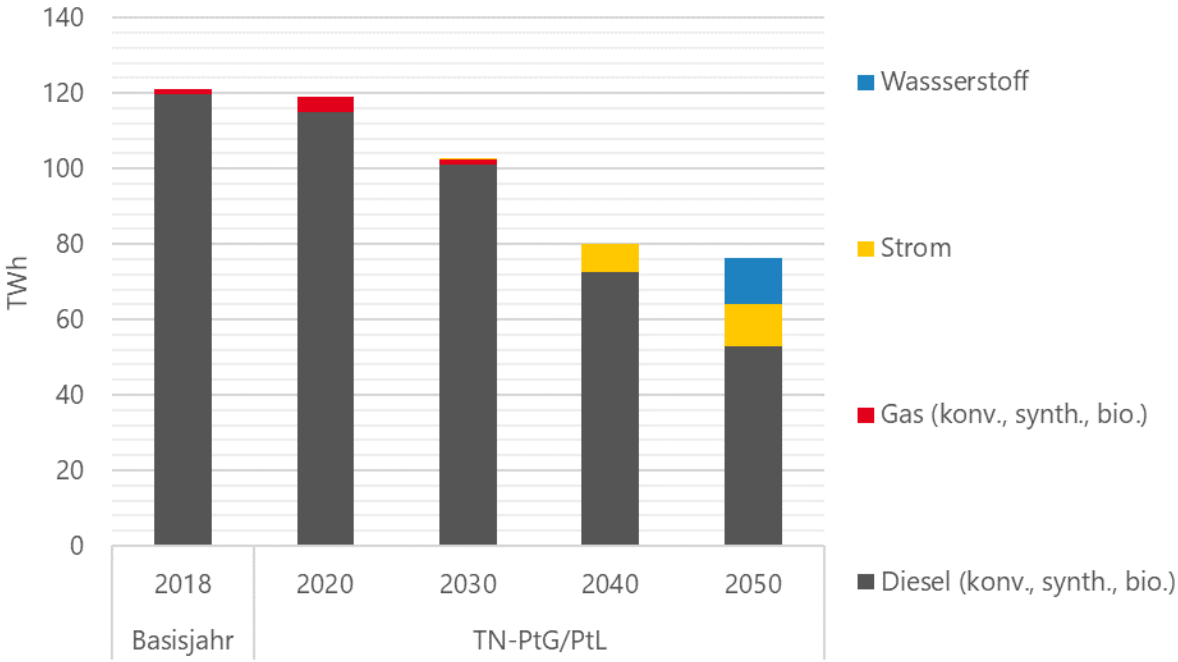
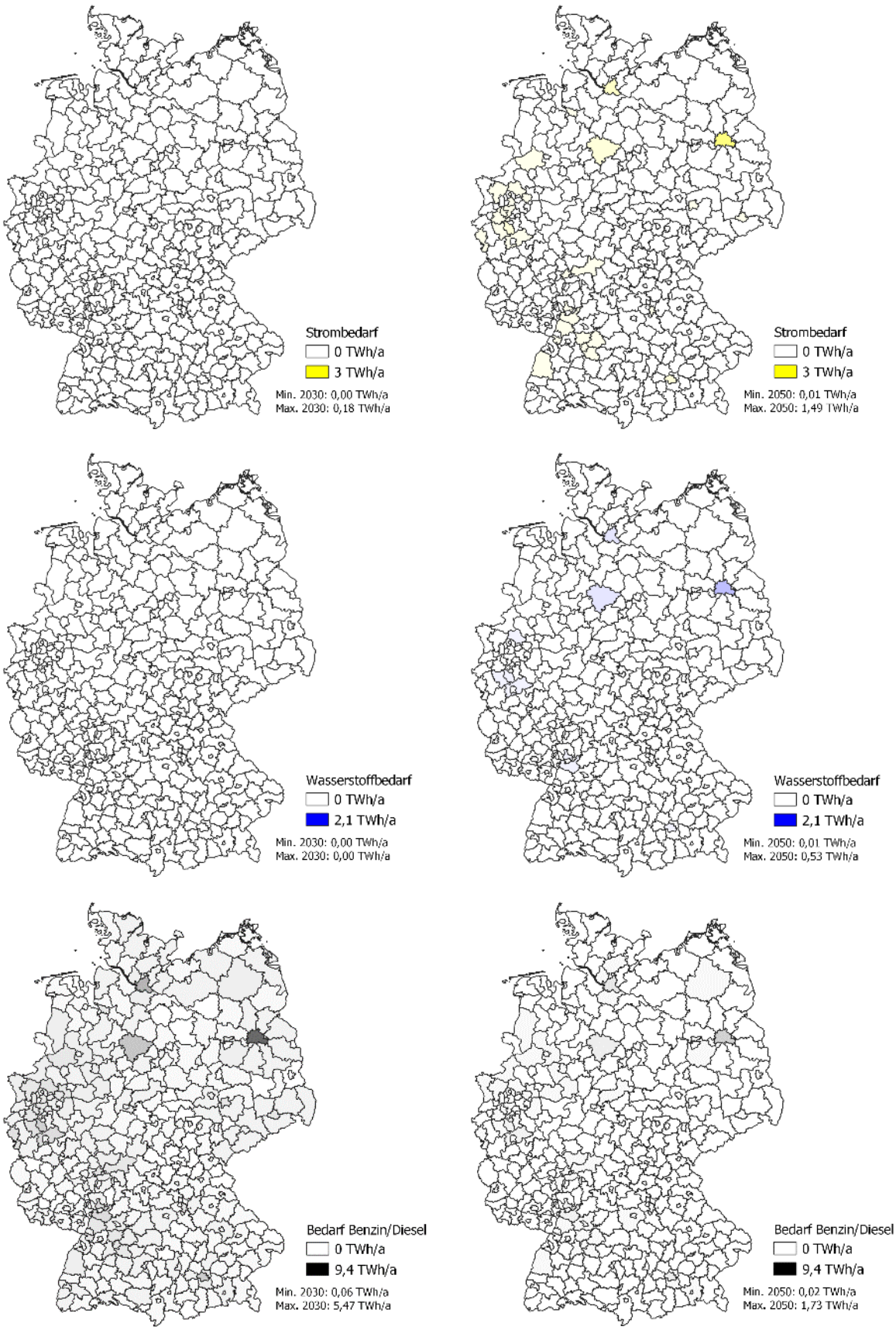


Abbildung 33 stellt die regionale Verteilung des Endenergiebedarfs für Nutzfahrzeuge für Strom, Wasserstoff und Benzin bzw. Diesel im Jahr 2030 und 2050 dar. Die Farbskalen sind dabei so gewählt, dass Abbildungen für jeweils einen Kraftstoff im gesamten Bericht vergleichbar sind, Minimal- und Maximalwerte im jeweiligen Szenario und Jahr sind direkt an der Abbildung angegeben. Der Strombedarf konzentriert sich in diesem Szenario stärker auf städtische Gebiete, da er zu größeren Teilen von leichten und mittleren Nutzfahrzeugen stammt. Nachladen an der Autobahn findet, aufgrund mangelnder Infrastruktur, nicht statt. Der Wasserstoffbedarf fällt mit maximal 0,53 TWh/a in 2050 wieder vergleichsweise gering aus. Es verbleibt ein deutlicher Bedarf an Dieselkraftstoff, der langfristig biogen oder synthetisch sein muss. Im Maximum 2050 werden in einem einzelnen Kreis 1,73 TWh/a nachgefragt.

Abbildung 33: Regionaler Endenergiebedarf Nfz im Szenario *TN-PtG/PtL* 2030 und 2050



Weitere Verkehrsträger

Im Szenario *TN-PtG/PtL* wird davon ausgegangen, dass alle konventionellen Kraftstoffe durch synthetische oder biogene ersetzt werden. Hier werden die zuvor beschriebenen Effizienzverbesserungen berücksichtigt und unumgängliche Entwicklungen wie die (Teil-) Elektrifizierung im Busverkehr. Folgende Annahmen werden für die Verkehrsträger abseits der Pkw und Nfz getroffen:

- Im Luftverkehr wird angenommen, dass das gesamte Luftverkehrsaufkommen bis 2050 mit Flugzeugen mit biogenen oder PtL-Kraftstoffen bewältigt wird.
- Im Hochseeverkehr und der Binnenschifffahrt kommen ebenfalls ausschließlich biogene oder PtL-Kraftstoffe zum Einsatz.
- Im Schienenverkehr wird auf Strecken abseits der Oberleitung bis 2050 weiterhin Diesel eingesetzt, der bis 2050 aus biogenen oder PtL-Kraftstoffen hergestellt wird.
- Der Busverkehr wird bis 2050 zu 50 % auf elektrische Antriebe umgestellt, um die lokalen Emissionen in Städten zu senken. 50 % der Kilometer werden mit elektrischen Bussen, 50 % mit biogenen oder PtL-Kraftstoffen zurückgelegt (v.a. die Langstreckenfahrten).

Für die weiteren Verkehrsträger ergibt sich ein Energiebedarf wie in Tabelle 10 und Tabelle 11 dargestellt. Es zeigt sich also auch hier insgesamt ein Rückgang der Endenergienachfrage nach 2030 bei gleichzeitig steigendem Verkehrsaufkommen. Allerdings ist dieser um rund 10 TWh/a höher als im Szenario *TN-Strom*. Rein elektrisch werden etwa 13 TWh genutzt, der Rest wird in diesem Szenario zu 100 % aus biogenen oder synthetischen Kraftstoffen gedeckt.

Tabelle 10: Energieverbrauch aller Verkehrsträger ohne Pkw und Nutzfahrzeuge im Szenario *TN-PtG/PtL* unterteilt nach Kraftstoffen und Verkehrsträgern

Energieverbrauch [TWh/a]	2020	2030	2040	2050
Luftverkehr				
Kerosin	120,2	141,0	145,2	119,6
Hochseeschiffe				
Schiffsdiesel/LSFO	43,4	48,2	48,8	45,6
Binnenschifffahrt				
LSFO	3,9	4,2	3,9	3,5
Busse				
Diesel	10,7	10,0	7,0	3,9
Strom	0,4	0,9	1,5	2,0
Schiene				
Diesel	4,3	5,9	5,5	5,3
Strom	8,9	12,3	11,5	10,9
Gesamtergebnis	191,8	222,4	223,5	190,8

Tabelle 11: Energieverbrauch aller Verkehrsträger ohne Pkw und Nutzfahrzeuge im Szenario *TN-PtG/PtL* unterteilt nach Kraftstoffen

Energieverbrauch [TWh/a]	2020	2030	2040	2050
Diesel	15,0	15,9	12,6	9,2
Kerosin	120,2	141,0	145,2	119,6
LSFO	3,9	4,2	3,9	3,5
Schiffsdiesel/LSFO	43,4	48,2	48,8	45,6
Strom	9,3	13,2	13,0	12,9
Gesamtergebnis	**191,8**	**222,4**	**223,5**	**190,8**

2.5 Ergebnisse des Szenarios TN-H_2

2.5.1 Endenergiebedarf

Abbildung 34 stellt den Energiebedarf des Verkehrssektors im Szenario *TN-H_2* aufgeschlüsselt nach Verkehrsträgern dar. Der gesamte Endenergiebedarf sinkt von 770 TWh auf 420 TWh ab. Verglichen mit den anderen treibhausgasneutralen Szenarien ist die Reduktion des Szenarios *TN-H_2* von 45 % im Jahr 2050 gegenüber dem Basisjahr 2018 um vier Prozentpunkte höher als im Szenario *TN-PtG/PtL* und sechs Prozentpunkte niedriger als im Szenario *TN-Strom.* Die Brennstoffzelle liegt in ihrem Wirkungsgrad zwischen dem effizienteren Elektromotor und dem weniger effizienten Verbrennungsmotor. Aufgrund dieser Wirkungsgradunterschiede ordnet sich das Szenario *TN-H_2* zwischen den beiden anderen treibhausgasneutralen Szenarien ein. Die Entwicklung der einzelnen Verkehrsträger ist dabei unterschiedlich und wird im Folgenden dargestellt.

Der Endenergiebedarf des *Pkw-Verkehrs* geht bis 2050 auf 134 TWh zurück. Dies entspricht einer Reduktion um 66 %. Einsparungen werden durch strikte Effizienzsteigerungen inklusive milder Hybridisierung sowie einen weiterhin hohen Anteil von BEV und PHEV erreicht. Im Vergleich zum Szenario *TN-Strom* ist der Anteil BEV langfristig etwas kleiner und wird insbesondere durch FCEV ergänzt. Dadurch ist der Endenergiebedarf 2050 um 24 TWh höher. Auch der leichte Rückgang der Verkehrsleistung unterstützt den Rückgang des Endenergiebedarfs. Der Anteil der Pkw am Endenergiebedarf im Verkehrssektor geht damit von heute über 50 % auf 32 % zurück.

Auch im *Lkw-Verkehr* sind deutliche Reduktionen des Endenergiebedarfs möglich. Es wird davon ausgegangen, dass keine zusätzliche Infrastruktur aufgebaut wird, die die direkte Nutzung elektrischer Energie durch Nutzfahrzeuge ermöglicht. Der Einsatz elektrischer Nutzfahrzeuge wird damit auf Fahrzeuge reduziert, die täglich am heimischen Depot nachgeladen werden können. Das Szenario *TN-H_2* ähnelt insbesondere bis 2030 stark dem Szenario *TN-Strom*. Für leichte und mittlere Nutzfahrzeuge ist Elektrifizierung daher auch im Szenario *TN-H_2* die kosteneffizienteste Lösung. Bei schweren Nutzfahrzeugen kommen langfristig verstärkt FCEV zum Einsatz, falls die Reichweite der Batteriefahrzeuge nicht mehr ausreichend ist. Dadurch wird der Endenergiebedarf für Nutzfahrzeuge bis 2050 um 44 % reduziert. Der Endenergiebedarf für Nutzfahrzeuge liegt 2050 bei 103 TWh. Der Anteil der Nutzfahrzeuge am Endenergiebedarf im Verkehr steigt im Szenario *TN-H_2* von 2018 bis 2050 um einen Prozentpunkt auf 25 % an.

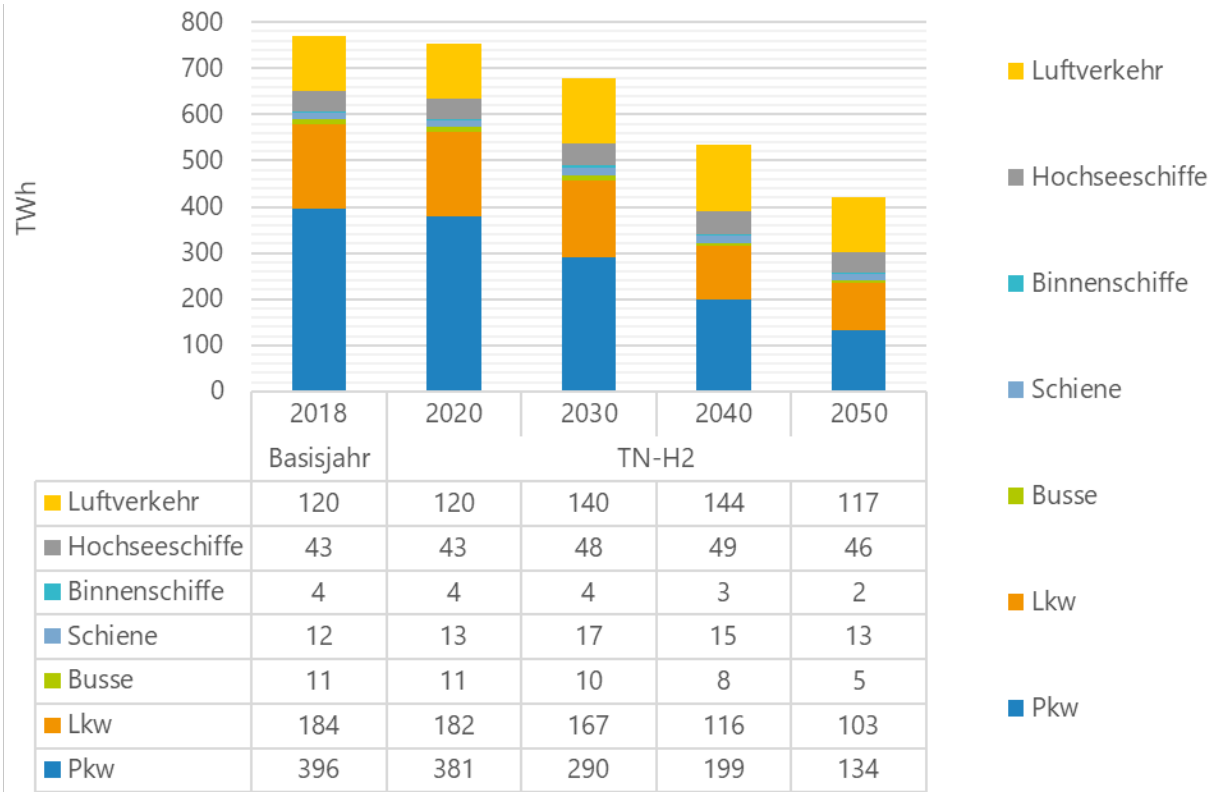
Der *Schienenverkehr* wird auf Strecken abseits der heutigen Oberleitungen bis 2050 auf Wasserstoff umgestellt. Aufgrund steigenden Verkehrsaufkommens steigt der Endenergiebedarf mittelfristig von 12 auf 17 TWh an, erreicht jedoch 2050 mit 13 TWh wieder nahezu den Ausgangswert.

In der *Binnenschifffahrt* halbiert sich der Endenergiebedarf bis 2050 auf 2 TWh. Die Binnenschifffahrt wird dafür langfristig vollständig auf Wasserstoff umgestellt. Das Szenario *TN-H_2* erreicht damit für Binnenschiffe den niedrigsten Endenergiebedarf aller Szenarien.

Der Endenergiebedarf der *Hochseeschifffahrt* entwickelt sich in allen treibhausgasneutralen Szenarien identisch, da hier davon ausgegangen wird, dass der Kraftstoff, aufgrund der benötigten Reichweiten, weiterhin vollständig als LSFO/Schiffsdiesel zur Verfügung gestellt werden muss. Reduktionen durch Effizienzsteigerungen (siehe Abschnitt 2.3.2.3) werden durch das steigende Verkehrsaufkommen überkompensiert. Die Bedeutung der Hochseeschifffahrt nimmt dadurch zu; sie stellt im Szenario *TN-H_2* 2050 11 % des Endenergiebedarfs im Verkehr.

Im *Luftverkehr* kommt im Szenario *TN-H_2* für den nationalen Luftverkehr langfristig Wasserstoff zum Einsatz. Der internationale Flugverkehr wird weiterhin, aufgrund der benötigten Reichweiten, mit Kerosin abgewickelt, das 2050 vollständig aus biogenen oder synthetischen Quellen zur Verfügung gestellt werden muss. Nach einem Anstieg des Endenergiebedarfs bis 2040, aufgrund höheren Verkehrsaufkommens, sinkt der Wert durch Effizienzsteigerungen und die teilweise Umstellung auf Wasserstoff bis 2050 leicht unter das Ausgangsniveau auf 117 TWh ab. Der Anteil des Luftverkehrs am Endenergiebedarf im Verkehr steigt dabei von heute 16 % auf 28 % in 2050 an.

Abbildung 34: Endenergiebedarf des Verkehrs nach Verkehrsträgern im Szenario *TN-H_2*



	2018 Basisjahr	2020 TN-H2	2030 TN-H2	2040 TN-H2	2050 TN-H2
Luftverkehr	120	120	140	144	117
Hochseeschiffe	43	43	48	49	46
Binnenschiffe	4	4	4	3	2
Schiene	12	13	17	15	13
Busse	11	11	10	8	5
Lkw	184	182	167	116	103
Pkw	396	381	290	199	134

Abbildung 35 stellt den Endenergiebedarf im Szenario *TN-H_2* gegliedert nach Energieträgern dar. Bis 2030 stellt sich das Szenario *TN-H_2* in seiner grundlegenden Ausrichtung als Mischung zwischen den beiden treibhausgasneutralen Szenarien *TN-Strom* und *TN-PtG/PtL* dar. Zwar entwickeln sich fahrzeugseitig techno-ökonomische Bedingungen, wie zum Beispiel Fahrzeugpreise inklusive Batterie, analog zum Szenario *TN-Strom*, gleichzeitig entspricht jedoch der Rahmen eher dem Szenario *TN-PtG/PtL*. Dazu zählt, dass Laden bei der Arbeit deutlich weniger Nutzern zur Verfügung steht als im Szenario *TN-Strom*. Außerdem wird davon ausgegangen, dass kein gesteuertes Laden von Elektrofahrzeugen möglich ist. Dadurch liegt der Strompreis für private Elektrofahrzeuge 2030 5 ct/kWh höher als im Szenario *TN-Strom*. Gleichzeitig stehen FCEV und Wasserstoff bis 2030 noch nicht kosteneffizient zur Verfügung. Nach 2030 rückt Wasserstoff im Szenario *TN-H_2* im Verkehr stärker in den Fokus. Weitere Kostensenkungspotenziale bei der Brennstoffzellentechnologie sowie der Kraftstoffbereitstellung machen FCEV bei hohen Fahrleistungen attraktiv. Gleichzeitig entwickelt sich die Batterietechnologie, die auch bei

FCEV zum Einsatz kommt, besser als im Szenario *TN-PtG/PtL*, allerdings nicht ganz auf dem Niveau des Szenarios *TN-Strom*.

Der Einsatz von *Benzin- und Dieselkraftstoffen* exklusive Schiffsdiesel geht im Szenario *TN-H_2* von 586 TWh auf 28 TWh zurück. Die Reduktion fällt damit im Vergleich aller treibhausgasneutralen Szenarien am stärksten aus. Dazu trägt insbesondere die Umstellung des schweren Straßengüterverkehrs auf Wasserstoff bei. Im Szenario *TN-Strom* wird hier durch den Einsatz von HO-Dieseln abseits der Oberleitung noch eine Restmenge Diesel benötigt. Dadurch kann das Szenario *TN-H_2* den Bedarf nach Diesel und Benzin auch gegenüber diesem Szenario um weitere 11 TWh senken. Die verbleibenden Diesel- und Benzinkraftstoffe werden dabei nahezu vollständig für Pkw eingesetzt. 2050 müssen diese aus biogenen Quellen stammen. Der Anteil am Endenergiebedarf im Verkehr sinkt von heute 75 % auf 7 % in 2050 ab.

Der Bedarf an *Schiffsdiesel* steigt zunächst - aufgrund des steigenden Verkehrsaufkommens - leicht an, kann aber bis 2050 wieder leicht gesenkt werden und liegt dann bei 46 TWh, 1 TWh unter dem Ausgangswert. Leichte Reduktionen gegenüber den anderen treibhausgasneutralen Szenarien sind durch den Einsatz von Wasserstoff in der Binnenschifffahrt möglich, während in der Hochseeschifffahrt weiterhin vollständig auf Diesel gesetzt wird. Der Anteil des Schiffsdiesels am gesamten Endenergiebedarf im Verkehr steigt dabei von 6 % auf 11 % an.

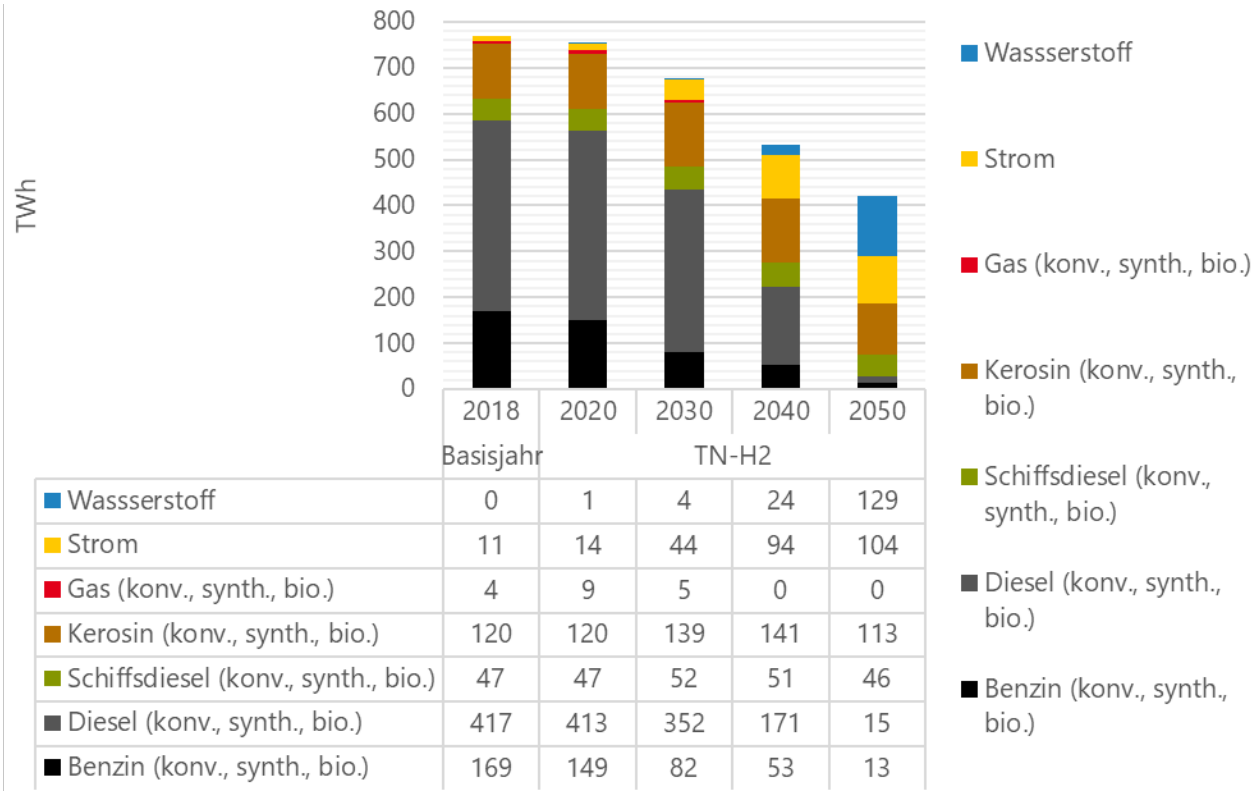
Auch der Bedarf an *Kerosin* steigt zunächst an und fällt anschließend unter das Ausgangsniveau auf 113 TWh. Analog zur Schifffahrt wird im Szenario *TN-H_2* im Luftverkehr davon ausgegangen, dass der nationale Verkehr mit Wasserstoff erfolgen kann. Im internationalen Verkehr wird weiterhin Kerosin eingesetzt. Damit ist der Kerosinbedarf im Szenario *TN-H_2* identisch zum Kerosinbedarf im Szenario *TN-Strom* und liegt leicht unter dem Szenario *TN-PtG/PtL*. 2050 muss das Kerosin vollständig aus biogenen Quellen zur Verfügung gestellt werden. Die Bedeutung von Kerosin als Endenergieträger nimmt dabei zu. Der Anteil am gesamten Endenergiebedarf im Verkehr steigt von 16 % auf 27 % an.

Der *elektrische Endenergiebedarf* steigt bis 2050 auf 104 TWh an. Der elektrische Endenergiebedarf 2050 ist damit in den Szenarien *TN-PtG/PtL* und *TN-H_2* identisch.

Der *Wasserstoffbedarf* steigt mit 129 TWh im Szenario *TN-H_2* bis 2050 auf knapp ein Drittel des Endenergiebedarfs im Verkehr an. Für Flugzeuge, Bahn, Busse und Binnenschiffe werden dabei insgesamt 12 TWh benötigt. 62 TWh fallen für Nutzfahrzeuge, 55 TWh für Pkw an. Sehr günstige Brennstoffzellentechnologie sowie die langfristig günstige Bereitstellung des Kraftstoffes führt dazu, dass FCEV bei hohen und mittleren Fahrleistungen wirtschaftlich sind.

Gas (CNG und LNG) spielt im Szenario *TN-H_2* keine Rolle.

Abbildung 35: Endenergiebedarf des Verkehrs nach Energieträgern im Szenario *TN-H₂*



	2018 Basisjahr	2020 TN-H2	2030 TN-H2	2040 TN-H2	2050 TN-H2
Wassserstoff	0	1	4	24	129
Strom	11	14	44	94	104
Gas (konv., synth., bio.)	4	9	5	0	0
Kerosin (konv., synth., bio.)	120	120	139	141	113
Schiffsdiesel (konv., synth., bio.)	47	47	52	51	46
Diesel (konv., synth., bio.)	417	413	352	171	15
Benzin (konv., synth., bio.)	169	149	82	53	13

2.5.2 Detailanalysen

2.5.2.1 Verkehrs- und Fahrleistung

Die Verkehrs- und Fahrleistung wird in allen treibhausgasneutralen Szenarien als identisch angenommen. Daher entspricht die Verkehrs- und Fahrleistung im Szenario *TN-H₂* den Beschreibungen des Szenarios *TN-Strom* in Abschnitt 2.3.2.1.

2.5.2.2 Flottenentwicklung

Pkw

Abbildung 36 stellt die Entwicklung des Pkw-Bestands nach Antriebsarten für das Szenario *TN-H₂* dar. Der leichte Rückgang der Fahrzeugbestände ist in allen treibhausgasneutralen Szenarien identisch.

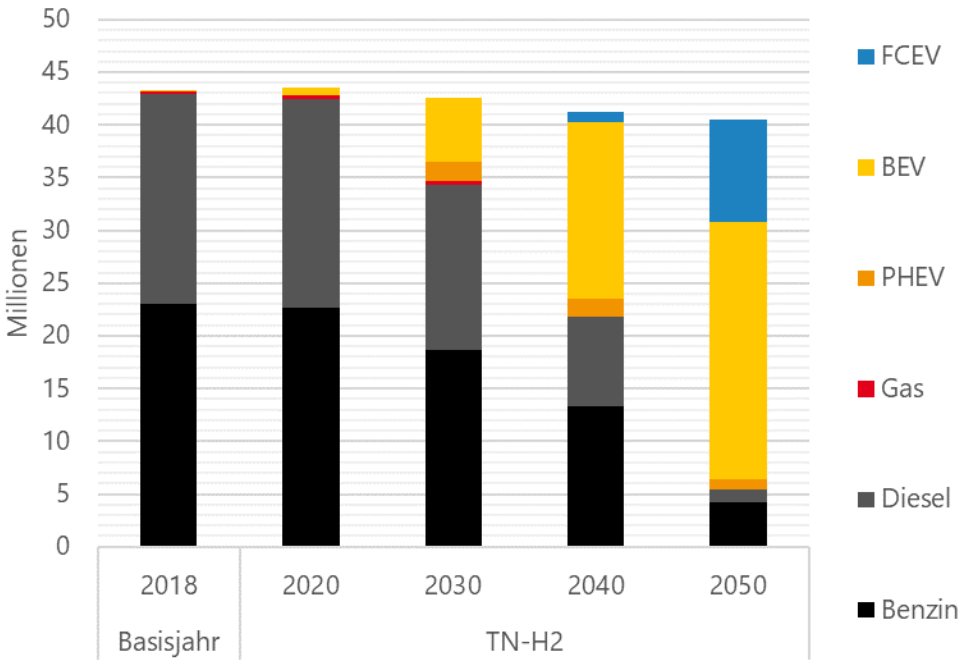
Der Bestand an Elektrofahrzeugen steigt bis 2030 auf 7,9 Millionen Fahrzeuge, das entspricht 18,5 % des gesamten Pkw-Bestands, an. Damit wird das Minimalziel der Bundesregierung von 7 Millionen Elektrofahrzeugen erreicht. Niedrigere Batteriepreise unterstützen dabei die Verbreitung von Elektrofahrzeugen. Im Vergleich zu den anderen treibhausgasneutralen Szenarien ähnelt der Bestand 2030 dem des Szenarios *TN-PtG/PtL*. Zwar sind im Szenario *TN-H₂* die Batteriepreise niedriger, allerdings ist Benzin und Diesel, aufgrund einer im Vergleich zum Szenario *TN-PtG/PtL* als geringer angenommenen Beimischungsquote von PtX-/BtX-Kraftstoffen in der Preisstruktur, etwas günstiger. Beide Effekte gleichen sich in Bezug auf den Bestand elektrischer Fahrzeuge nahezu aus. Gleichzeitig bleibt der Bestand an Elektro-Pkw hinter dem Szenario *TN-Strom* (11 Millionen EV 2030) zurück. Ursache ist hierbei der höhere Strompreis für Privatkunden, da im Szenario *TN-H₂* nicht von gesteuertem Laden ausgegangen wird. 2030 handelt es sich bei 77 % der Elektrofahrzeuge um BEV, bei knapp einem Viertel handelt es sich um PHEV.

Bis 2050 steigt der Anteil der Elektrofahrzeuge auf 25 Millionen Fahrzeuge an. Dabei handelt es sich bei 96 % um reine BEV und bei 4 % um PHEV. Mit einem Anteil von 62 % Elektrofahrzeuge am Gesamtbestand liegt das Szenario *TN-H_2* über dem Szenario *TN-PtG/PtL* (52 %) und unter dem Szenario *TN-Strom* (88 %).

FCEV spielen im Szenario *TN-H_2* im Pkw-Bereich im Vergleich zu den anderen Szenarien eine große Rolle. Ein wirtschaftlicher Betrieb scheint jedoch auch im Szenario *TN-H_2* erst nach 2030 möglich. Dies ist zum einen auf vergleichsweise hohe Fahrzeuginvestitionen, zum anderen auf hohe Kraftstoffkosten zurückzuführen. Es wird an dieser Stelle davon ausgegangen, dass bei der Einführung eines neuen Kraftstoffes im größeren Still vollständig auf erneuerbaren Wasserstoff gesetzt wird und die Preise entsprechend den Einsatz von grauem Wasserstoff nicht widerspiegeln. Bis 2050 steigt der Anteil der FCEV am Pkw-Bestand auf 24 % (9,7 Millionen Fahrzeuge). Der Anteil liegt damit deutlich über den Szenarien *TN-PtG/PtL* (3 %) und *TN-Strom* (4 %). Vergleichsweise günstige Fahrzeugpreise sowie günstiger Wasserstoff machen FCEV auch für den Einsatz bei mittleren Fahrleistungen, die in anderen Szenarien durch PHEV abgedeckt werden, attraktiv.

Diesel und Benzinfahrzeuge werden kontinuierlich ersetzt. Ab 2050 werden im Rahmen der Modellgenauigkeit keine rein verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeuge mehr neu zugelassen. Bereits zuvor kommen die Fahrzeuge primär bei geringen Fahrleistungen zum Einsatz, bei denen die höheren Investitionen für BEV, PHEV und FCEV nicht durch die Einsparungen während der Nutzung kompensiert werden können. Ambitionierte ordnungspolitische Maßnahmen, z.B. ein mittelfristiges Verbot für Verbrennungsmotoren, könnten diese Entwicklung weiter beschleunigen, wurden jedoch zugunsten der Vergleichbarkeit der Szenarien nicht modelliert. Auch eine mögliche Einstellung der Produktion aufgrund gesunkener Nachfrage könnte die Ersetzung von Diesel- und Benzinfahrzeugen zwischen 2030 und 2050 zusätzlich beschleunigen.

Abbildung 36: Entwicklung des Pkw-Bestands bis 2050 im Szenario *TN-H_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).

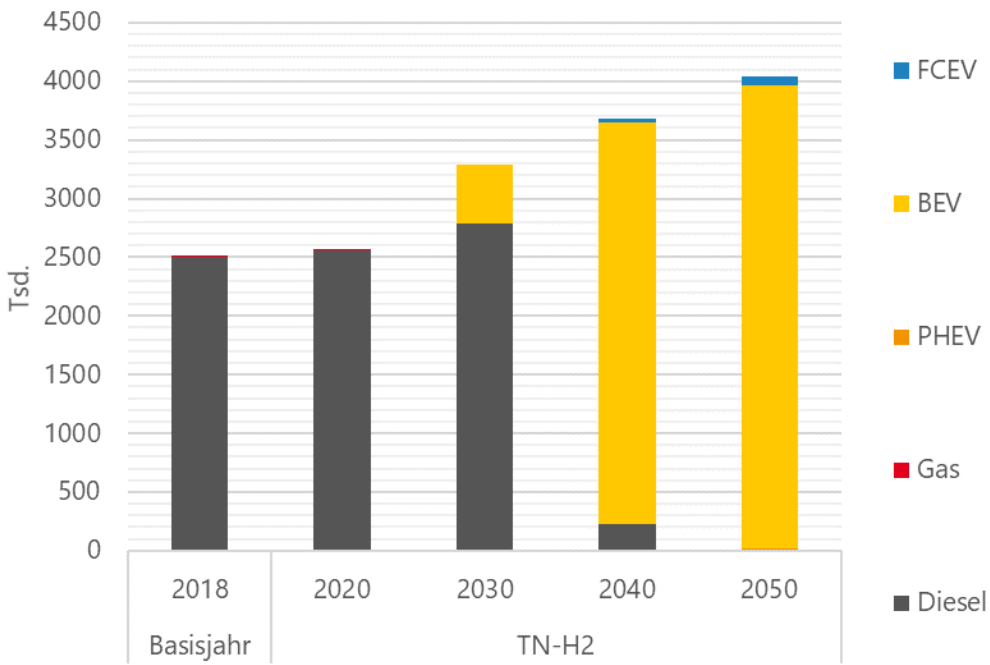
Abbildung 40 stellt die Entwicklung des Bestands leichter Nutzfahrzeuge im Szenario *TN-H_2* dar. Der Anteil von BEV liegt 2030 bei knapp über 15 % und ist damit identisch zum Szenario *TN-Strom*. Für Nutzfahrzeuge unterscheiden sich die Szenarien *TN-H_2* und *TN-Strom* bis 2030 nicht, da sich niedrigere Strompreise durch gesteuertes Laden annahmegemäß nur auf Privatkunden auswirken. Bis 2050 steigt der Anteil der BEV im Szenario *TN-H_2* für leichte Nutzfahrzeuge auf knapp 98 % an. Unterschiede zum Stromszenario von rund 50.000 BEV resultieren aus etwas höheren Batteriepreisen sowie dem günstigeren Wasserstoffpreis.

Der Anteil der FCEV steigt im Szenario *TN-H_2* bis 2050 auf 2 % an. Mit rund 80.000 Fahrzeugen ist der Bestand damit doppelt so hoch wie in den anderen treibhausgasneutralen Szenarien. Dennoch sind FCEV bei leichten Nutzfahrzeugen nur in seltenen Fällen, insbesondere bei nicht ausreichender Reichweite von BEV, attraktiv.

Verbrenner spielen für leichte Nutzfahrzeuge 2050 keine Rolle mehr.

Eine Ausdifferenzierung des Szenarios *TN-H_2* als Szenario mit bevorzugtem Einsatz von Wasserstoff war für leichte Nutzfahrzeuge damit nicht möglich. Die hohe Effizienz des Elektromotors bei gleichzeitig hoher aber typischerweise regelmäßiger Fahrleistung ermöglicht mittelfristig, auch unter für Elektromobilität ungünstigeren Randbedingungen, den kosteneffizienten Einsatz von BEV.

Abbildung 37: Entwicklung des Bestands leichter Nutzfahrzeuge (<3,5 t) bis 2050 im Szenario *TN-H_2*



Die Entwicklung des Bestandes mittlerer Nutzfahrzeuge im Szenario *TN-H_2* wird in Abbildung 38 dargestellt. Sie entspricht im Wesentlichen der Entwicklung des Bestandes der leichten Nutzfahrzeuge. Bis 2030 ist die Entwicklung wiederum identisch zum Szenario *TN-Strom*. Der Anteil BEV liegt 2030 bei 8 %. Bis 2050 steigt der Anteil auf 84 % an. Damit liegt er knapp fünf Prozentpunkte unter dem Anteil in den Szenarien *TN-Strom* und *TN-PtG/PtL*.

FCEV werden langfristig insbesondere bei nicht ausreichender Reichweite der BEV eingesetzt. Aufgrund niedriger Brennstoffzellenkosten und günstiger Wasserstoffpreise können in diesem Szenario FCEV langfristig auch für Fahrprofile mit vergleichsweise geringer Fahrleistung interessant sein. Die Investition für FCEV ist dann niedriger als die für BEV, durch geringe Fahrleistung kommen die niedrigeren laufenden Kosten des BEV nur bedingt zum Tragen. Damit erreichen FCEV im Szenario *TN-H_2* 2050 einen Anteil von 14 % am Bestand der mittleren Nutzfahrzeuge. Damit liegt der Anteil 5 Prozentpunkte über den anderen treibhausgasneutralen Szenarien. Das Szenario *TN-H_2* ist damit für mittlere Nutzfahrzeuge etwas stärker auf Wasserstoff ausgerichtet, die direkte Nutzung von Elektrizität bleibt jedoch die dominierende Antriebsform.

Gas- und Dieselfahrzeuge spielen langfristig keine Rolle mehr für mittlere Nutzfahrzeuge.

Abbildung 38: Entwicklung des Bestands mittlerer Nutzfahrzeuge (3,5-12 t) bis 2050 im Szenario *TN-H_2*

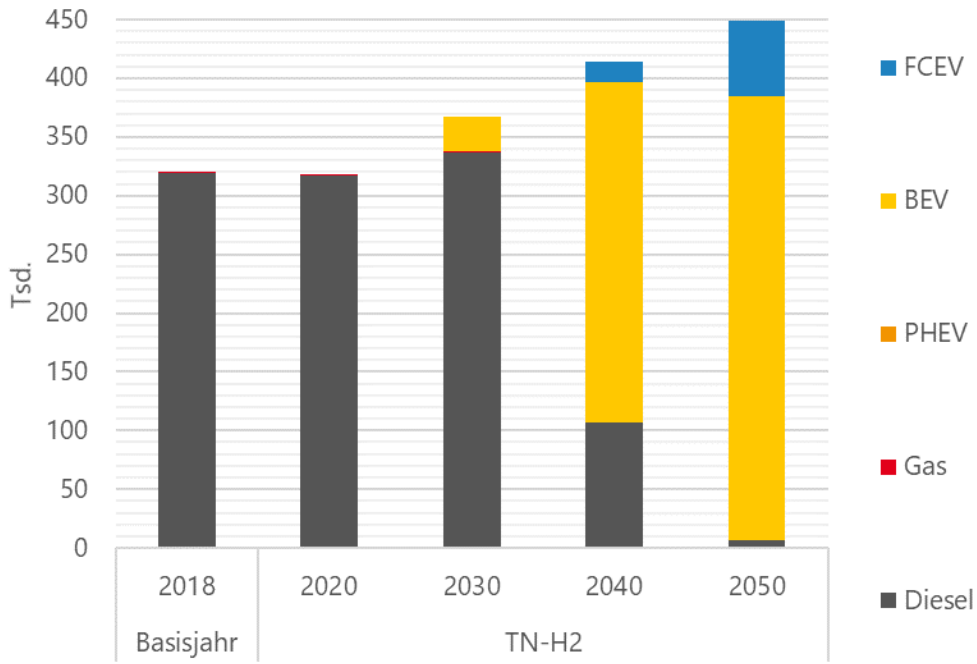


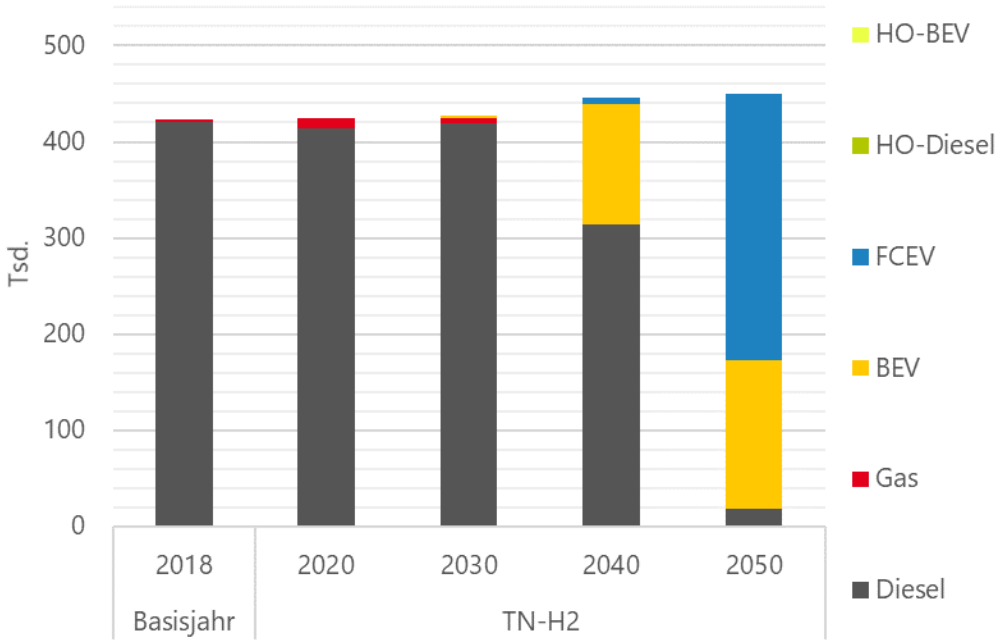
Abbildung 39 stellt die Bestandsentwicklung schwerer Nutzfahrzeuge im Szenario *TN-H_2* dar. Im Gegensatz zum Szenario *TN-Strom* steht im Szenario *TN-H_2* keine öffentliche Ladeinfrastruktur für Langstreckenanwendungen, z.B. in Form von Oberleitungen, zur Verfügung. Der Anteil der BEV am Bestand beträgt 2030 knapp 1 %, an den Neuzulassungen 9 %. Die Entwicklung ist damit ähnlich wie im Szenario *TN-PtG/PtL*. Die aktuell für 2030 geltenden Flottengrenzwerte für Neufahrzeuge in der Europäischen Union könnten gegebenenfalls knapp eingehalten werden (Breed 2020). Bei einer Verschärfung müssten Hersteller jedoch den Absatz elektrischer schwerer Nutzfahrzeuge weiter erhöhen. Bis 2050 steigt der Anteil der BEV bei schweren Nutzfahrzeugen auf 34 % an. Damit liegt er unter den Anteilen in den Szenarien *TN-PtG/PtL* (38 %) und *TN-Strom* (42 %).

Ähnlich wie bereits bei den mittleren Nutzfahrzeugen sind FCEV 2050 im Szenario *TN-H_2* auch bei schweren Nutzfahrzeugen günstiger als Diesel und BEV. Damit sind FECV nicht, wie in den anderen treibhausgasneutralen Szenarien, nur bei hohen Fahrleistungen auf nicht elektrifizierbaren Strecken interessant. Bei Fahrleistungen außerhalb der Batteriereichweite sind sie die wirtschaftlichste Option. Bei unterdurchschnittlichen Fahrleistungen kommen, aufgrund der niedrigeren Investition, ebenfalls FCEV zum Einsatz. Der Anteil der FCEV am Fahrzeugbestand der schweren Nutzfahrzeuge im Szenario *TN-H_2* erreicht 2050 62 %.

Diesel- und LNG-Fahrzeuge spielen langfristig im Szenario *TN-H_2* keine Rolle mehr, da ihre Investition, aufgrund weiterer Effizienzsteigerungen, sowie ihre laufenden Kosten höher sind als bei FCEV.

Zusammengefasst werden bei schweren Nutzfahrzeugen im Szenario *TN-H_2* langfristig verstärkt FCEV eingesetzt. Für mittlere Jahresfahrleistungen dominieren jedoch weiterhin BEV. Politische Maßnahmen könnten auch in diesem Szenario den Einsatz von BEV und FCEV beschleunigen, sind jedoch aus Vergleichsgründen nicht Teil der Modellierung.

Abbildung 39: Entwicklung des Bestands schwerer Nutzfahrzeuge (>12 t) bis 2050 im Szenario *TN-H_2*



2.5.2.3 Endenergiebedarf nach Verkehrsträgern

Pkw

Der Endenergiebedarf für Pkw sinkt im Szenario *TN-H_2* bis 2050 auf 134 TWh. Dies entspricht einer Reduktion um 66 % gegenüber dem heutigen Endenergiebedarf. Im Vergleich zu den anderen treibhausgasneutralen Szenarien liegt der Endenergiebedarf des Szenarios *TN-H_2* bei Pkw 2050 17 TWh unter dem des Szenarios *TN-PtG/PtL* und 24 TWh über dem des Szenarios *TN-Strom*. Reduktionen resultieren im Wesentlichen aus dem, im Vergleich zum Verbrennungsmotor, hohen Wirkungsgrad von BEV und FCEV. Gleichzeitig ist jedoch die Brennstoffzelle weniger effizient als der Elektromotor. Daher ist der Endenergieverbrauch im Szenario *TN-Strom* nochmals kleiner. Abbildung 40 fasst den Endenergiebedarf für Pkw im Szenario *TN-H_2* zusammen.

Der elektrische Endenergiebedarf für Pkw steigt bis 2030 auf 26 TWh, bis 2050 auf 54 TWh. Damit entspricht der elektrische Endenergiebedarf im Szenario *TN-H_2* 2030 weitestgehend dem des Szenarios *TN-PtG/PtL*. Die Entwicklung der Elektrifizierung verläuft hier bis 2030 ähnlich, während das Szenario *TN-Strom* mit 40 TWh einen deutlich höheren Bedarf aufweist. In der Perspektive bis 2050 benötigt das Szenario *TN-H_2* 25 TWh weniger als im Szenario *TN-Strom* und 3 TWh mehr als im Szenario *TN-PtG/PtL*. 2050 entfallen 40 % des Endenergiebedarfs für Pkw im Szenario *TN-H_2* auf Strom.

Benzin- und Dieselkraftstoffe gehen im Szenario *TN-H_2* für Pkw bis 2030 um ein Drittel auf 261 TWh zurück. Bis 2050 sinkt der Bedarf auf 25 TWh ab. Dies entspricht 19 % des gesamten Endenergiebedarfs

für Pkw 2050. Er liegt damit 9 TWh über dem Szenario *TN-Strom*. Benzin- und Dieselfahrzeuge werden zukünftig primär von Wenigfahrern eingesetzt.

Der Wasserstoffbedarf für Pkw steigt bis 2050 auf 55 TWh an. Der Anteil am Endenergiebedarf für Pkw liegt 2050 bei 41 %. Wasserstoff wird in diesem Szenario zum einen von Fahrzeugen mit hoher Fahrleistung eingesetzt, für die die elektrische Reichweite nicht ausreichend ist. Gleichzeitig ist Wasserstoff aber auch für Fahrzeuge mit geringerer Fahrleistung attraktiv, da die Investition in ein FCEV im Szenario *TN-H_2*, abhängig von der Fahrzeugklasse, günstiger ist als in ein BEV. Der Bedarf an Wasserstoff liegt im Szenario *TN-H_2* damit 2050 über den Szenarien *TN-Strom* (+ 40 TWh) und *TN-PtG/PtL* (+ 37 TWh).

CNG spielt im Szenario *TN-H_2* für Pkw langfristig keine Rolle

Abbildung 40: Endenergiebedarf Pkw bis 2050 im Szenario *TN-H_2*

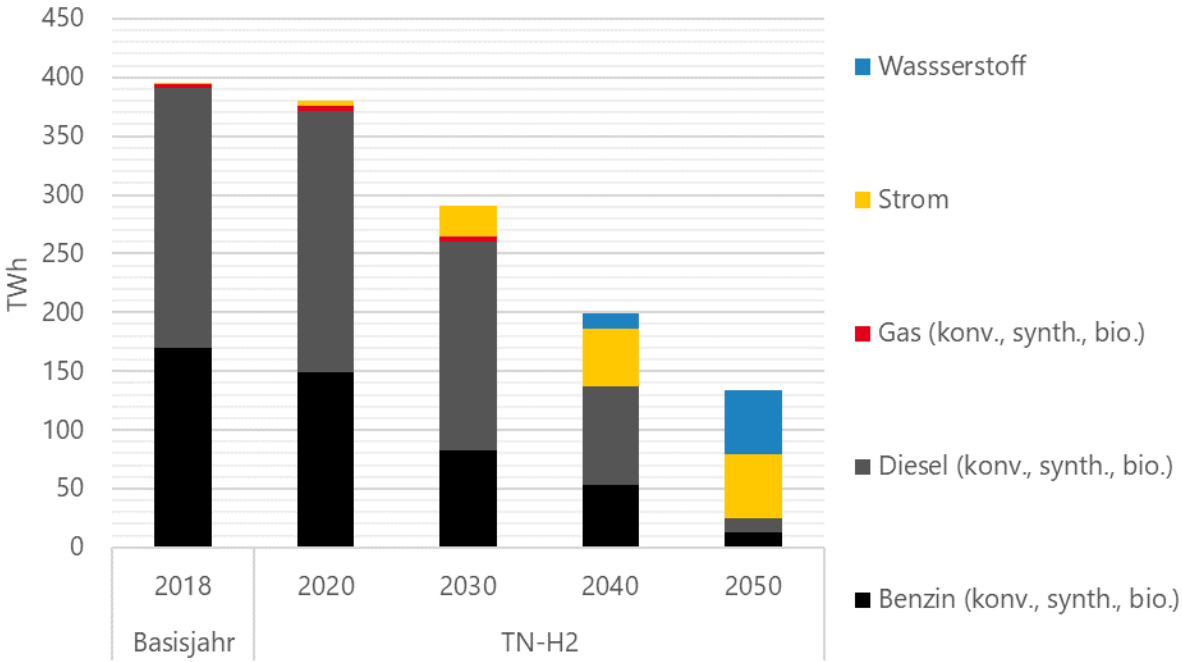
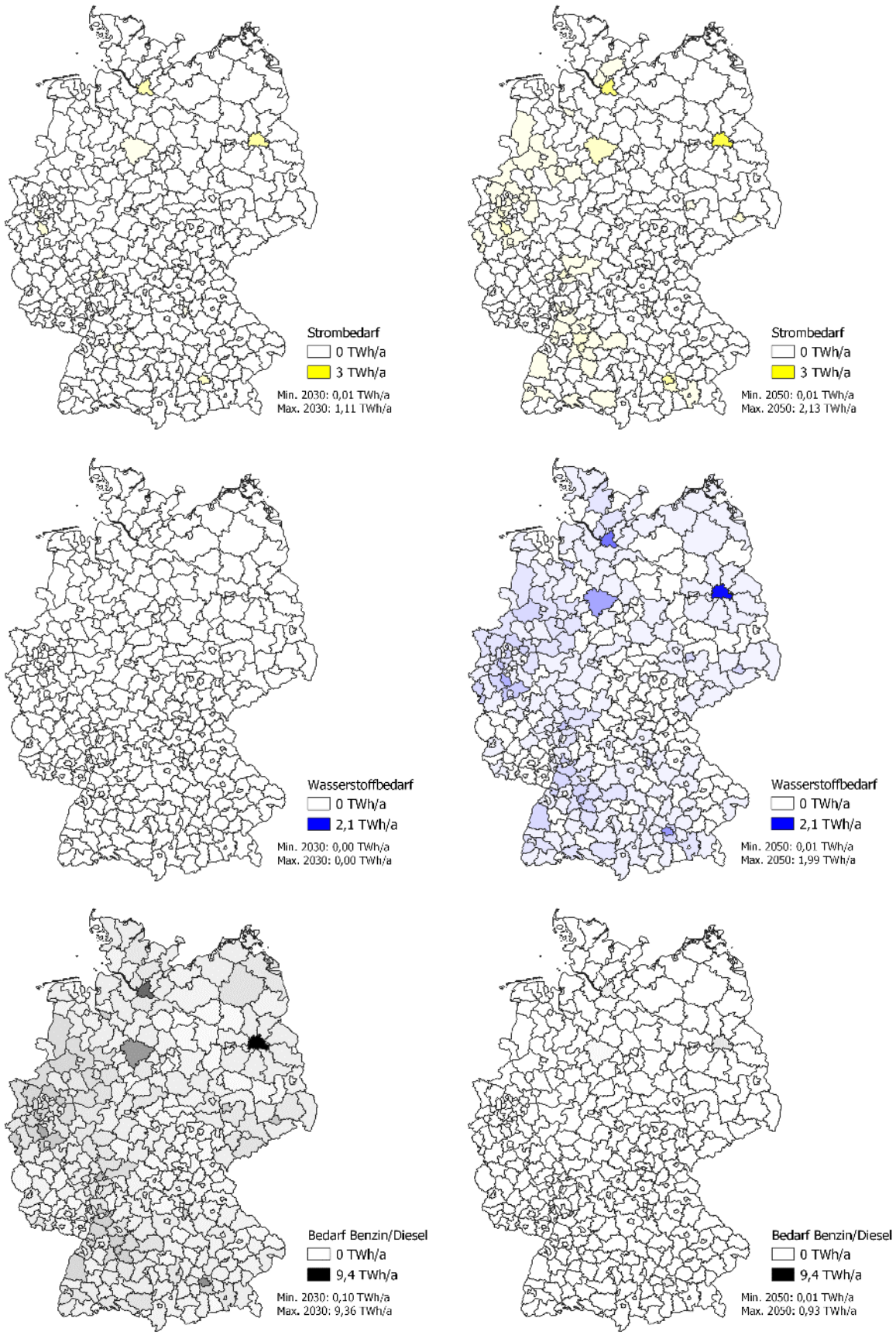


Abbildung 41 stellt die regionale Verteilung des Endenergiebedarfs der Pkw für Strom, Wasserstoff und Benzin bzw. Diesel im Jahr 2030 und 2050 dar. Die Farbskalen sind dabei so gewählt, dass Abbildungen für jeweils einen Kraftstoff im gesamten Bericht vergleichbar sind, Minimal- und Maximalwerte im jeweiligen Szenario und Jahr sind direkt an der Abbildung angegeben. Die Karten zeigen auch im Szenario *TN-H_2* einen deutlichen Bedarf für elektrische Endenergie. Gleichzeitig zeigt sich jedoch auch eine deutliche Nachfrage für Wasserstoff, von bis zu 2 TWh/a in Berlin im Jahr 2050. Diese entsteht jedoch auch im Szenario *TN-H_2* erst nach 2030. Benzin- und Dieselkraftstoffe werden deutlich reduziert.

Abbildung 41: Regionaler Endenergiebedarf Pkw im Szenario *TN-H₂* 2030 und 2050



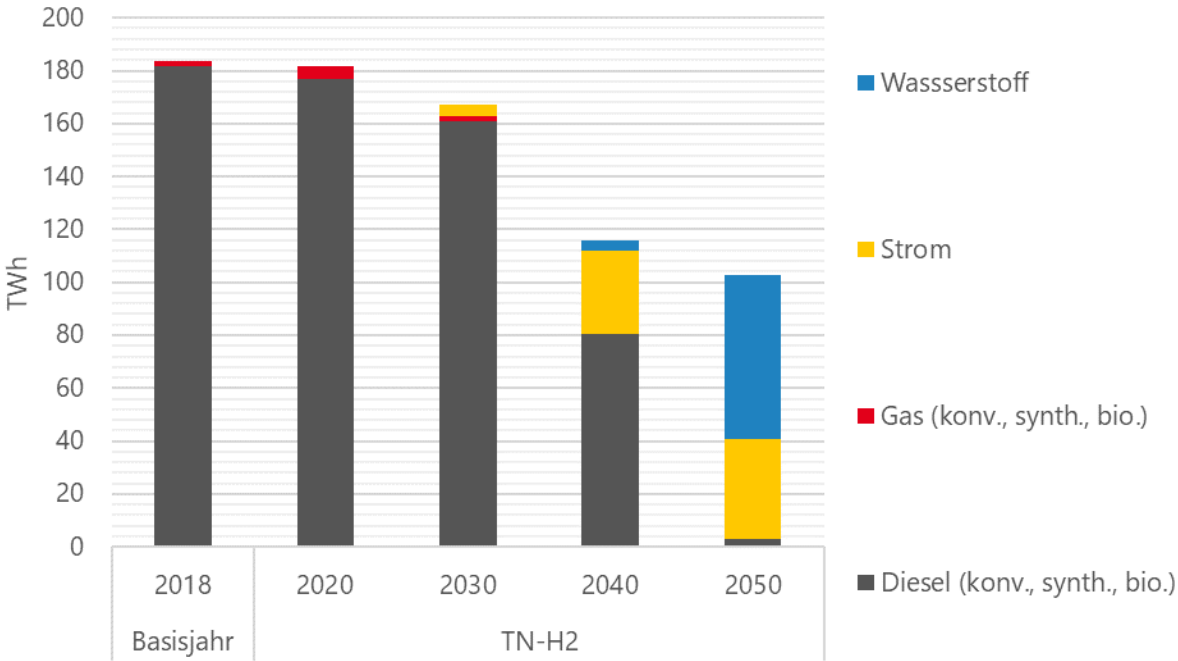
Nutzfahrzeuge

Der Endenergiebedarf für Nutzfahrzeuge im Szenario *TN-H_2* reduziert sich bis 2030 um 9 % auf 167 TWh. Die Entwicklung ist dabei in allen treibhausgasneutralen Szenarien weitestgehend identisch. Reduktionen werden durch Effizienzsteigerungen sowie die beginnende Elektrifizierung ermöglicht. Gleichzeitig reduziert das Verkehrswachstum jedoch die absolute Reduktion. Nach 2030 kommt es auch im Szenario *TN-H_2* zunehmend zur Elektrifizierung der Fahrzeuge. Eine Infrastruktur, die die Elektrifizierung schwerer Nutzfahrzeuge auf der Langstrecke ermöglichen würde, steht jedoch nicht zur Verfügung. Daher sinkt der Endenergiebedarf für Nutzfahrzeuge bis 2050 deutlich geringer als im Szenario *TN-Strom* und erreicht 2050 103 TWh. Dies entspricht einer Reduktion von 44 % gegenüber dem heutigen Niveau.

Der elektrische Endenergiebedarf steigt im Szenario *TN-H_2* bis 2030 auf knapp über 4 TWh, bis 2050 auf 37 TWh an. Gas spielt langfristig keine Rolle. Wasserstoff ist langfristig mit 62 TWh der bedeutendste Kraftstoff im Szenario *TN-H_2*. Sein Anteil am Endenergiebedarf für Nutzfahrzeuge liegt 2050 bei 61 %. Der Bedarf nach Dieselkraftstoffen für Lkw sinkt im Szenario *TN-H_2* deutlich stärker ab als in den anderen treibhausgasneutralen Szenarien und erreicht 2050 3 TWh.

Abbildung 42 fasst den Endenergiebedarf für Nutzfahrzeuge im Szenario *TN-H_2* zusammen.

Abbildung 42: Endenergiebedarf Nutzfahrzeuge bis 2050 im Szenario *TN-H_2*

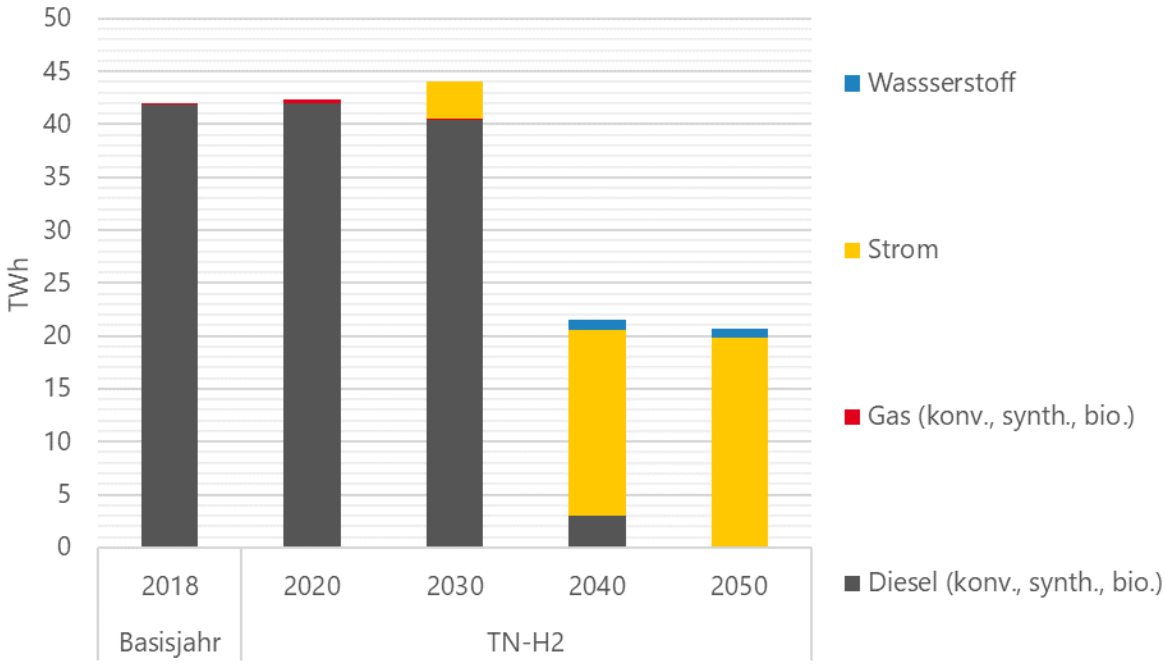


Im Folgenden wird der Endenergiebedarf bei Nutzfahrzeugen in den einzelnen Größenklassen - leicht (<3,5 t), mittel (3,5-12 t), schwer (>12t) - detailliert dargestellt.

Bei leichten Nutzfahrzeugen steigt der elektrische Endenergiebedarf bis 2030 auf 3,5 TWh, bis 2050 auf 20 TWh an. Die Entwicklung ist dabei in allen Szenarien identisch. Es erfolgt in allen Szenarien die nahezu vollständige Umstellung auf Elektromobilität. Ursache hierfür ist die im Vergleich zu Pkw höhere Fahrleistung, die dazu führt, dass sich die höhere Investition durch vergleichsweise niedrige laufende Kosten amortisieren kann. Der langfristige Bedarf an Diesel (0 TWh), Gas (0 TWh) und Wasserstoff (0,9 TWh) ist äußerst gering.

Die Entwicklung des Endenergiebedarfs für leichte Nutzfahrzeuge im Szenario *TN-H_2* ist in Abbildung 43 dargestellt.

Abbildung 43: Endenergiebedarf leichte Nutzfahrzeuge bis 2050 im Szenario *TN-H₂*



In der Klasse der mittleren Nutzfahrzeuge dominieren langfristig ebenfalls BEV. Im Jahr 2050 setzt sich der Endenergiebedarf mittlerer Nutzfahrzeuge im Szenario *TN-H₂* zu 70 % aus Strom, 3 % aus Diesel und 27 % aus Wasserstoff zusammen.

Abbildung 44 stellt den Endenergiebedarf im Szenario *TN-H₂* für mittlere Nutzfahrzeuge dar.

Abbildung 44: Endenergiebedarf mittlerer Nutzfahrzeuge bis 2050 im Szenario *TN-H₂*

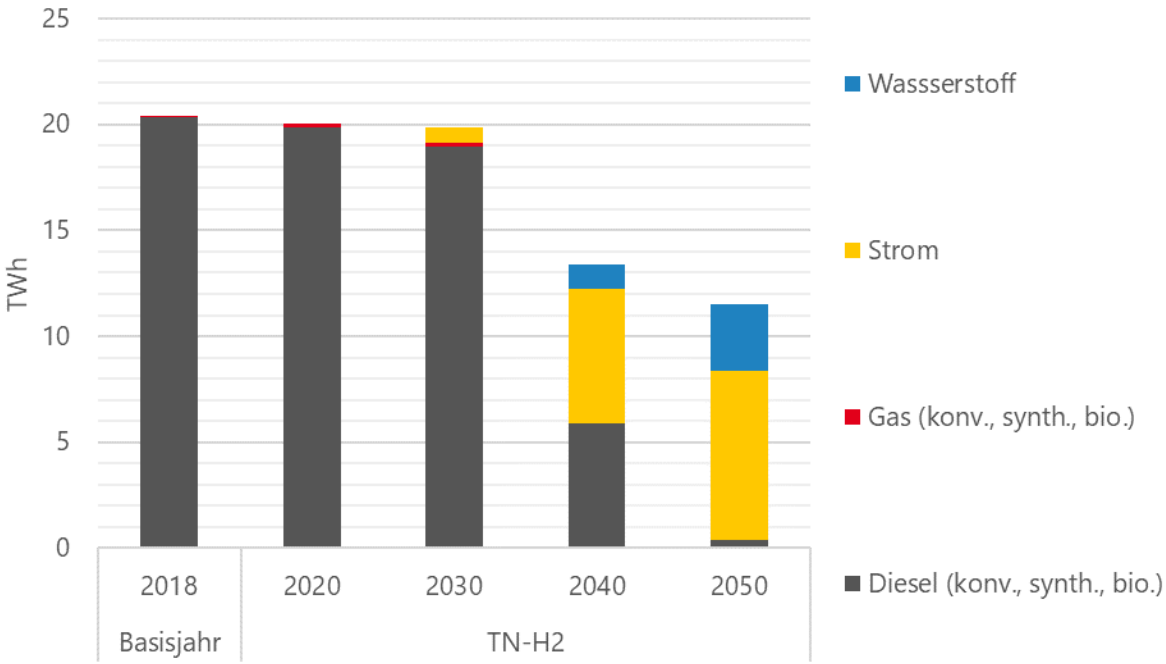


Abbildung 45 stellt die Entwicklung des Endenergiebedarfs für schwere Nutzfahrzeuge im Szenario *TN-H_2* dar.

Im Szenario *TN-H_2* sinkt der Endenergiebedarf für schwere Nutzfahrzeuge bis 2050 auf 71 TWh ab. Dies entspricht einer Reduktion von 42 %. Der Endenergiebedarf 2050 liegt damit 6 TWh unter dem des Szenarios *TN-PtG/PtL*, jedoch 19 TWh über dem des Szenarios *TN-Strom*.

Der elektrische Endenergiebedarf liegt 2050 bei 10 TWh. Dies liegt eine TWh unter dem Verbrauch der reinen BEV im Szenario *TN-Strom*. Der Einsatz elektrischer Energie ist damit auch im Szenario *TN-H_2* in der Regel die wirtschaftlichste Alternative, sofern die Reichweite der Fahrzeuge ausreichend ist. Der Dieselbedarf geht bis 2050 auf 3 TWh zurück und liegt damit deutlich unter den anderen treibhausgasneutralen Szenarien. Wasserstoff stellt 2050 mit 58 TWh 82 % des Endenergiebedarfs für schwere Nutzfahrzeuge im Szenario *TN-H_2*. Der Wasserstoffbedarf liegt damit über den Szenarien *TN-PtG/PtL* (+ 46 TWh) und *TN-Strom* (+ 58 TWh). Wasserstoff wird primär auf Fahrprofilen eingesetzt, bei denen die elektrische Reichweite nicht ausreichend ist.

Das Szenario *TN-H_2* beschreibt eine Welt, die in den Rahmenbedingungen zunächst stark dem Szenario *TN-Strom* ähnelt, allerdings wird darauf verzichtet, eine Ladeinfrastruktur für schwere Nutzfahrzeuge auf der Langstrecke zur Verfügung zu stellen. Erste Verschärfungen der CO_2-Gesetzgebung werden zunächst durch die Elektrifizierung kurzer Verkehre erfüllt. Mittel- und langfristig erfolgt, begünstigt durch Preissenkungen bei der Brennstoffzellentechnologie, die Umstellung des Fernverkehrs auf Wasserstoff.

Abbildung 45: Endenergiebedarf schwere Nutzfahrzeuge bis 2050 im Szenario *TN-H_2*

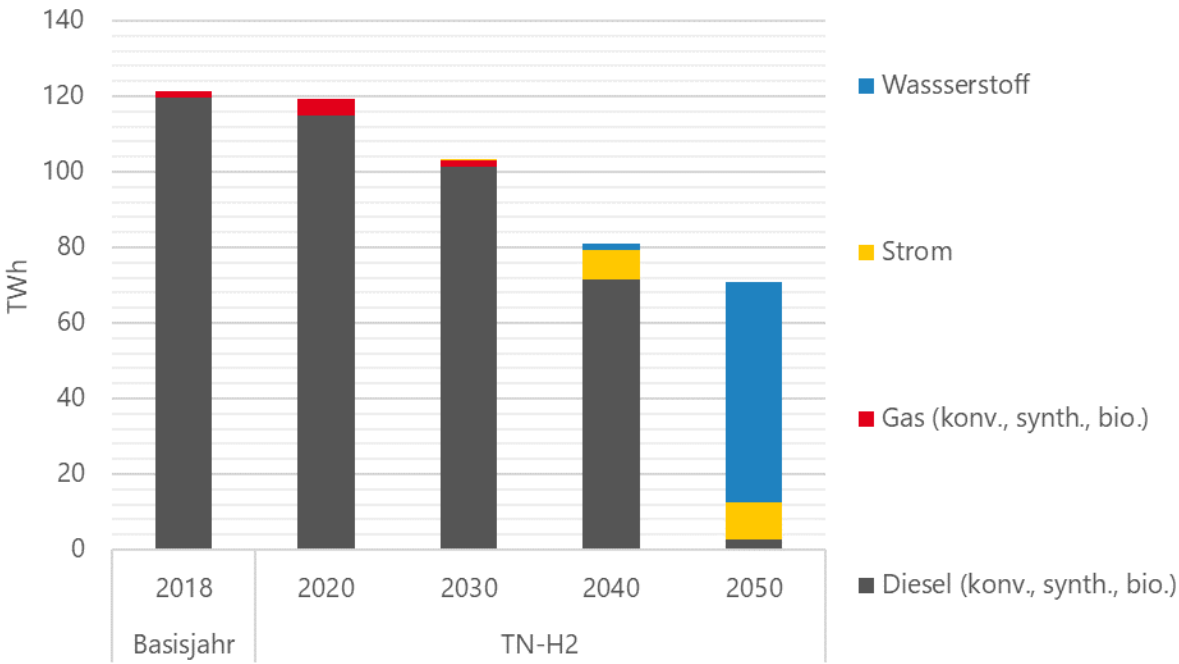
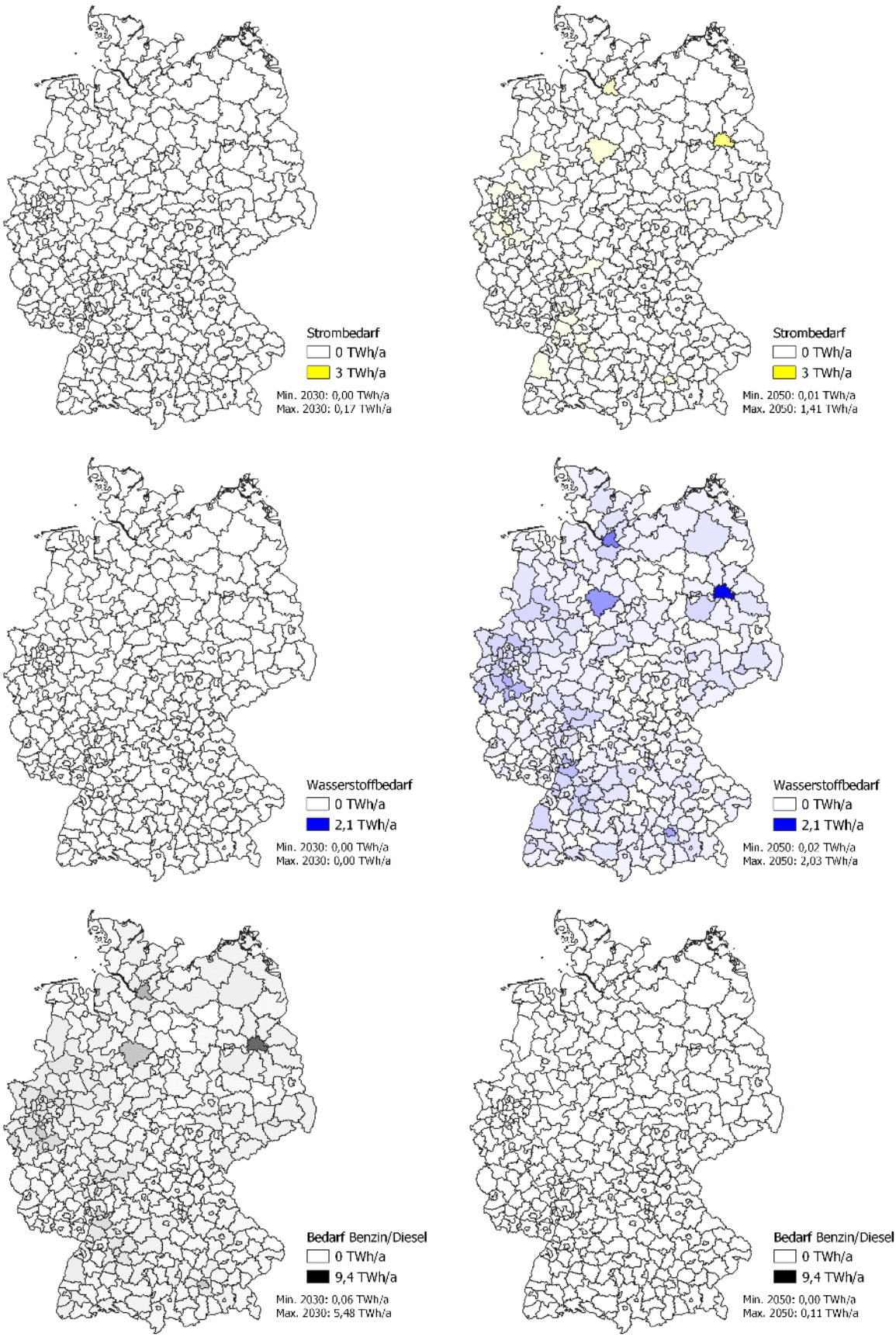


Abbildung 46 stellt die regionale Verteilung des Endenergiebedarfs der Nutzfahrzeuge für Strom, Wasserstoff und Benzin bzw. Diesel im Jahr 2030 und 2050 dar. Die Farbskalen sind dabei so gewählt, dass Abbildungen für jeweils einen Kraftstoff im gesamten Bericht vergleichbar sind, Minimal- und Maximalwerte im jeweiligen Szenario und Jahr sind direkt an der Abbildung angegeben. Während sich der Strombedarf, ähnlich wie im Szenario TN-PtG/PtL wiederum primär auf städtische Gebiete konzentriert, verteilt sich die Nachfrage nach Wasserstoff auch in die Fläche und stellt die Versorgung an Autobahnen sicher. Auch hier bildet sich die Nachfrage erst nach 2030 aus und erreicht 2050 bis zu 2 TWh/a in einzelnen Kreisen, in denen städtische Nachfrage und Autobahnen zusammenfallen.

Abbildung 46: Regionaler Endenergiebedarf Nfz im Szenario *TN-H₂* 2030 und 2050



Weitere Verkehrsträger

Im Szenario *TN-H_2* wird angestrebt, alle bis 2050 möglichen Potenziale von Wasserstoff im Verkehr weitgehend auszunutzen. Dies ist in vielen Verkehrsträgern nicht zu 100 % möglich, vor allem die nicht straßengebundenen Verkehrsträger können nur teilweise mit Wasserstoff betrieben werden. Folgende Annahmen werden für die Verkehrsträger abseits des Pkw- und Nutzfahrzeugverkehrs getroffen:

- Im Luftverkehr wird angenommen, dass das nationale Luftverkehrsaufkommen bis 2050 mit Flugzeugen mit Wasserstoffantrieb zu bewältigen ist. Der internationale Luftverkehr bleibt, aufgrund der hohen Reichweitenanforderungen, weiterhin auf Kerosin angewiesen, das 2050 aus erneuerbaren Quellen zur Verfügung gestellt werden muss.
- Im Hochseeverkehr werden aufgrund der großen benötigten Reichweiten und Zeiten auf See sowie der im Vergleich zu konventionellen Kraftstoffen zu geringen Energiedichte von Wasserstoff keine Varianten mit Wasserstoffantrieb berücksichtigt.
- In der Binnenschifffahrt wird davon ausgegangen, dass der gesamte Binnenschiffsverkehr bis 2050 mit Wasserstoff betrieben werden kann.
- Im Schienenverkehr wird auf Strecken abseits der Oberleitung bis 2050 Wasserstoff eingesetzt (vgl. NOW 2020).
- Der Busverkehr wird bis 2050 vollständig auf alternative Antriebe umgestellt. 50 % der Kilometer werden mit elektrischen Bussen, 50 % mit Wasserstoff zurückgelegt (v.a. die Langstreckenfahrten).

Es ergibt sich damit ein Energiebedarf für weitere Verkehrsträger wie in Tabelle 12 und Tabelle 13 dargestellt. Es zeigt sich also auch hier insgesamt ein Rückgang der Endenergienachfrage nach 2030 bei gleichzeitig steigendem Verkehrsaufkommen. Eine Nutzung von Wasserstoff ist vor allem im Bahn-, Bus- und Binnenschiffsverkehr möglich. Gleichzeitig bleibt ein Anteil rein elektrischer Antriebe in gleicher Größenordnung bestehen. Die verbleibenden Mengen an Diesel, Kerosin und LSFO werden in diesem Szenario zu 100 % aus biogenen oder synthetischen Kraftstoffen gedeckt. Der gesamte Energiebedarf dieser Verkehrsträger ist mit 2,4 TWh/a oder etwa 1,5 % nur unwesentlich höher als im Szenario *TN-Strom*.

Tabelle 12: Energieverbrauch aller Verkehrsträger ohne Pkw und Nutzfahrzeuge im Szenario *TN-H_2* unterteilt nach Kraftstoffen und Verkehrsträgern

Energieverbrauch [TWh/a]	2020	2030	2040	2050
Luftverkehr				
H2	0,0	1,3	3,3	5,0
Kerosin	120,2	139,1	140,6	112,5
Hochseeschiffe				
Schiffsdiesel/LSFO	43,4	48,2	48,8	45,6
Binnenschifffahrt				
H2	0,0	0,6	1,3	2,5
LSFO	3,9	3,4	1,9	0,0
Busse				
Diesel	9,9	8,3	4,0	0,0
H2	0,6	1,2	2,1	2,8
Strom	0,4	0,9	1,5	2,0
Schiene				
Diesel	4,3	4,7	2,8	0,0

Energieverbrauch [TWh/a]	2020	2030	2040	2050
H2	0,0	0,5	1,1	2,0
Strom	8,9	12,3	11,5	10,9
Gesamtergebnis	**191,5**	**220,4**	**218,9**	**183,2**

Tabelle 13: Energieverbrauch aller Verkehrsträger ohne Pkw und Nutzfahrzeuge im Szenario *TN-H_2* unterteilt nach Kraftstoffen

Energieverbrauch [TWh/a]	2020	2030	2040	2050
Diesel	14,1	13,0	6,8	0,0
Kerosin	120,2	139,1	140,6	112,5
LSFO	3,9	3,4	1,9	0,0
Schiffsdiesel/LSFO	43,4	48,2	48,8	45,6
Strom	9,3	13,2	13,0	12,9
H2	0,6	3,6	7,8	12,2
Gesamtergebnis	**191,5**	**220,4**	**218,9**	**183,2**

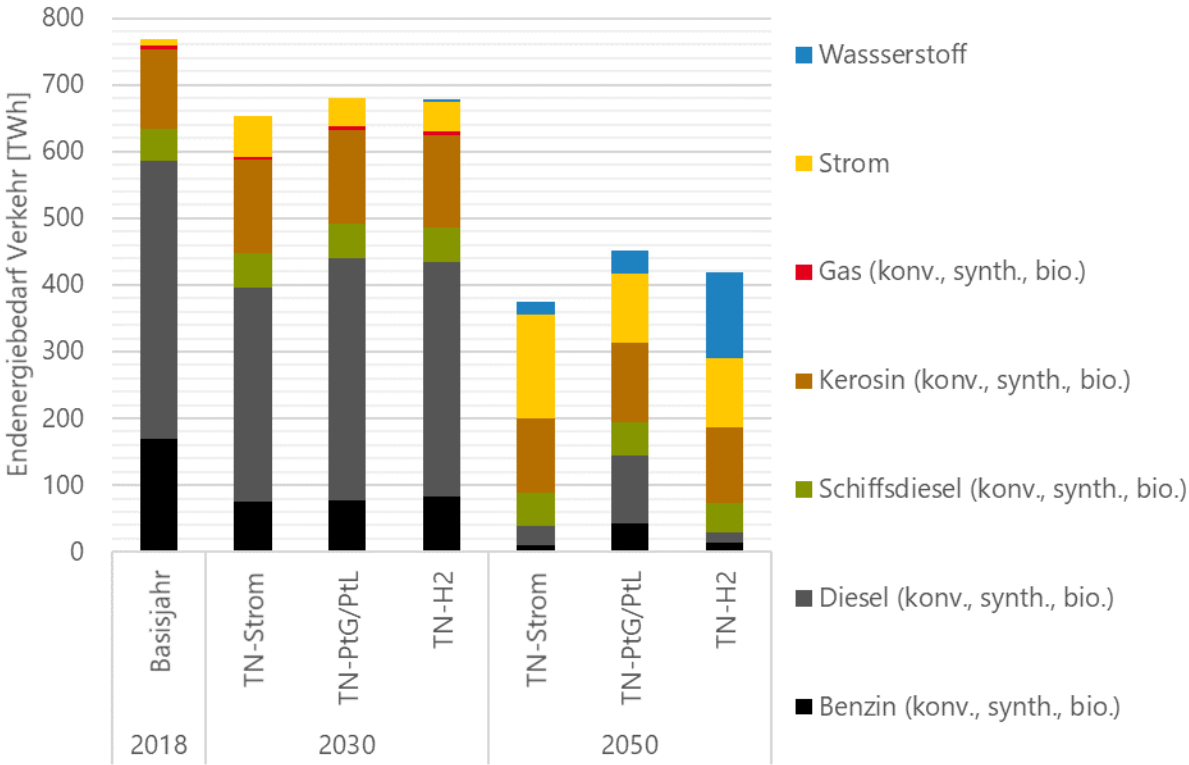
2.6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Für die Langfristszenarien 3 kommen zur Ermittlung des Endenergiebedarfs im Verkehr die beiden Modelle ASTRA (www.astra-model.eu) und ALADIN (www.aladin-model.eu) zum Einsatz. Das System Dynamics Modell ASTRA ermittelt die Verkehrsnachfrage, ALADIN simuliert agentenbasiert die Kaufentscheidung der Nutzer und die Antriebswahl für Pkw und Lkw. Für alle weiteren Verkehrsträger werden Abschätzungen vorgenommen.

2.6.1 Endenergiebedarf im Verkehr

Der Endenergiebedarf im Verkehr geht in allen drei Szenarien deutlich zurück. Zum einen ist dies auf weitere Effizienzsteigerungen konventioneller Antriebe zurückzuführen. Den größeren Beitrag für den Rückgang stellt jedoch der Antriebswechsel hin zu effizienteren Alternativen dar, insbesondere die Direktnutzung elektrischer Energie sowie Wasserstoff. Während im Güterverkehr die Verkehrsnachfrage wächst, trägt im Pkw-Bereich ein leichter Rückgang der Verkehrsnachfrage zur Reduktion des Endenergiebedarfs bei. Die stärkste Reduktion um 52 % wird dabei, aufgrund der hohen Effizienz elektrischer Antriebe, im Szenario *TN-Strom* erreicht. Im Szenario *TN-H_2* sinkt der Endenergiebedarf um 45 %, im Szenario *TN-PtG/PtL* um 42 %. Abbildung 47 stellt den Endenergiebedarf im Verkehr für alle Szenarien für 2030 und 2050 dar. 2050 wird der Endenergiebedarf in allen Szenarien aus Strom und BtL-/PtL-Kraftstoffen sowie insbesondere im Szenario *TN-H_2* aus Wasserstoff, gedeckt.

Abbildung 47: Endenergiebedarf im Verkehr nach Energieträgern



2.6.2 Entwicklung einzelner Verkehrsträger

Im *Pkw-Verkehr* geht der Endenergiebedarf, abhängig vom Szenario, um 62 % (*TN-PtG/PtL*), 66 % (*TN-H_2*) beziehungsweise 72 % (*TN-Strom*) gegenüber 2018 zurück. Die Reduktion des Endenergiebedarfs findet in allen Szenarien im Wesentlichen durch die Elektrifizierung der Flotte sowie ambitionierte Effizienzsteigerungen statt. Im Szenario *TN-Strom* handelt es sich dabei langfristig nahezu ausschließlich um rein batterieelektrische Fahrzeuge (78 % der Flotte). Der Anteil der Elektrofahrzeuge, inklusive Plug-In Hybriden, liegt 2050 bei 88 %. Im Szenario *TN-H_2* liegt dieser Anteil bei 62 %. Zusätzlich besteht hier ein Viertel der Flotte aus Brennstoffzellenfahrzeugen. Diese sind in den anderen Szenarien nur in kleinen Stückzahlen vorhanden. Sie kommen insbesondere für Langstreckenfahrer in Frage, konkurrieren jedoch dort mit Plug-In Hybriden. Aufgrund der geringen Stückzahl ist unklar, ob die Brennstoffzellenfahrzeuge und der erforderliche Infrastrukturaufbau in den Szenarien *TN-Strom* und *TN-PtG/PtL* tatsächlich realisiert werden würde. Weiterhin müsste eine Kostensenkung der hohen heutigen Fahrzeugpreise durch hohe Stückzahlen in anderen Weltmärkten wie China erreicht werden.

In den Szenarien *TN-Strom* und *TN-H_2* werden 2050 keine neuen Benzin- oder Dieselfahrzeuge mehr zugelassen. Es verbleiben jedoch kleine Restbestände, die dann mit biogenen oder ggf. auch synthetischen Kraftstoffen betrieben werden müssen. Im Szenario *TN-PtG/PtL* liegt der Anteil von Benzin- und Dieselfahrzeugen am Bestand hingegen 2050 bei 45 %. Es handelt sich primär um Fahrzeuge mit geringerer Fahrleistung, für die sich die höheren Anschaffungspreise alternativer Antriebe nicht amortisieren. Auch im Szenario *TN-PtG/PtL* sind Elektrofahrzeuge mit 52 % im Bestand die am meisten verbreitete Antriebsform. Damit dominieren elektrische Antriebe bei Pkw auch bei starker Variation der Rahmenparameter.

Für *leichte und mittlere Nutzfahrzeuge* findet in allen Szenarien langfristig eine fast vollständige Elektrifizierung statt. Hohe, aber gleichmäßige Fahrleistungen machen die in den laufenden Kosten günstigeren batterieelektrische Antriebe gegenüber den in der Investition günstigeren Dieselfahrzeugen wirtschaftlich. Bis 2030 steigt der Bestand batterieelektrischer Nutzfahrzeuge auf ca. 14 %. Bis 2050 steigt

der Anteil in allen Szenarien auf mindestens 96 % an. Brennstoffzellenantriebe werden für Nischenanwendungen, in denen hohe Reichweiten und viel Flexibilität gefordert sind, genutzt. Ihre Rolle hängt jedoch davon ab, ob die Fahrzeuge auch in kleinen Stückzahlen wirtschaftlich zur Verfügung gestellt werden können.
Bei *schweren Nutzfahrzeugen* unterscheiden sich die Szenarien deutlich. Für die Wirtschaftlichkeit der Fahrzeuge sind auch hier, aufgrund der hohen Fahrleistung, die laufenden Kosten entscheidend. Daher wird bis 2050 in allen Szenarien der ohne zusätzliche öffentliche Ladeinfrastruktur elektrifizierbare Flottenteil, unter den getroffenen Annahmen circa ein Drittel der Flotte, auf batterieelektrische Fahrzeuge umgestellt. Die Umstellung der restlichen Flotte erfolgt, abhängig vom Szenario und der damit verbundenen Infrastruktur, auf (Hybrid-) Oberleitungsfahrzeuge im Szenario *TN-Strom* sowie Brennstoffzellenfahrzeuge im Szenario *TN-H_2*. Die Oberleitung im Szenario *TN-Strom* steht stellvertretend für eine öffentliche Ladeinfrastruktur und kann eventuell durch Schnellladestationen erweitert oder ersetzt werden. Im Szenario *TN-PtG/PtL* werden Dieselfahrzeuge und teilweise Brennstoffzellenfahrzeuge eingesetzt.
Abhängig vom Szenario liegt die Reduktion des Endenergiebedarfs für Nutzfahrzeuge bis 2050 bei 41 % (*TN-PtG/PtL*), 44 % (*TN-H_2*) beziehungsweise 54 % (*TN-Strom*).

Luftverkehr sowie *Schifffahrt* nutzen in allen Szenarien nur zu kleinen Teilen alternative Antriebe, primär auf der Kurzstrecke beziehungsweise in der Binnenschifffahrt. Abhängig vom Szenario müssen hier, trotz hoher angenommener Effizienzsteigerungen, 160 bis 170 TWh im Jahr 2050 biogener oder synthetischer Kraftstoffe überwiegend für den internationalen Flug- und Schiffsverkehr zur Verfügung gestellt werden. Die unterstellten Steigerungsraten der Verkehrsleistung sind dafür der ausschlaggebende Treiber.

Der *Bus*- und *Schienenverkehr* spielt bezüglich des Energiebedarfes eine sehr untergeordnete Rolle, sind aber als Erst- oder Nischenmärkte für alternative Antriebe durchaus interessant.

2.6.3 Zentrale Schlussfolgerungen

Die hier dargestellten Szenarien spannen einen möglichen Lösungsraum zur Dekarbonisierung des Verkehrs auf. Gleichzeitig können aus dem Vergleich heraus zentrale Schlussfolgerungen abgeleitet werden.

Bei Pkw erscheint die Umstellung großer Teile der Flotte auf batterieelektrische Antriebe, unabhängig vom Szenario, aus heutiger Perspektive sicher. Die Schaffung entsprechender Rahmenbedingungen - zum Beispiel die Förderung von Ladeinfrastruktur, finanzielle Kaufanreize oder Zufahrtsbeschränkungen in Städte - ist daher sinnvoll, um die Umstellung gegebenenfalls zu beschleunigen.
Die langfristige Rolle von PHEV und FCEV sowie gegebenenfalls konventioneller Antriebe mit synthetischen Kraftstoffen ist bis zu einem gewissen Grad unsicher und hängt von den Rahmenbedingungen ab. Bei einer starken Fokussierung auf Strom ist es wahrscheinlich, dass langfristig technisch und ökonomisch attraktive BEV für alle Nutzergruppen, also auch Langstreckenfahrer mit hohen Reichweitenansprüchen, zur Verfügung stehen. Dies erscheint heute als sehr wahrscheinliches Szenario. Bei einer hohen Verbreitung von Wasserstoff oder synthetischen Kraftstoffen in anderen Bereichen können diese Antriebsalternativen jedoch auch langfristig relevante Anteile der Fahrzeugflotte stellen. Unklar ist an dieser Stelle insbesondere, ob und ab wann der Aufbau gegebenenfalls zusätzlich benötigter Infrastruktur, beispielsweise weiterer Wasserstofftankstellen, ökonomisch sinnvoll ist. Diese Entwicklung sollte mittelfristig weiter untersucht werden, so dass insbesondere Infrastrukturmaßnahmen, zielgerichtet gesteuert werden können.

Für leichte und mittlere Nutzfahrzeuge sollte die direkte Elektrifizierung ermöglicht und beschleunigt werden. Gleiches gilt für einen signifikanten Teil der schweren Nutzfahrzeuge. Insbesondere für Langstreckentransporte kann zukünftig Strom, Wasserstoff oder biogener/synthetischer Kraftstoff eingesetzt werden. Für alle Technologien sind in den nächsten Jahren Serienfahrzeuge angekündigt. Hier sollten die jeweiligen Vor- und Nachteile weiter analysiert werden und anschließend aufgrund der großen Hebelwirkung zügig der Infrastrukturaufbau initiiert werden.

Für Schiffe und Flugzeuge sollten Alternativen zu konventionellen Kraftstoffen 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. Ihr potenzieller Beitrag ist daher mit heutigem Wissensstand noch schwierig zu beurteilen.

2.6.4 Optionen zur weiteren Beschleunigung der Treibhausgasreduktion

Die hier vorgestellten Szenarien stellen Pfade dar, um bis 2050 Treibhausgasneutralität im Verkehr zu erreichen. Dabei werden bereits kurz- und mittelfristig deutliche Maßnahmen, beispielsweise hohe zusätzliche CO_2-Abgaben im Verkehr und Steuererleichterung für alternative Antriebe, berücksichtigt. Eine frühere Reduktion der Treibhausgasemissionen mit dem Ziel einer schnelleren Treibhausgasneutralität kann erreicht werden, ist jedoch mit weiteren, teils durchaus extremen Maßnahmen verbunden. Im Folgenden werden entsprechende Stellhebel für die einzelnen Verkehrsträger kurz vorgestellt.

Bei Pkw kann die Flottenumstellung kurzfristig durch die Verlängerung von Kaufprämien für emissionsfreie Fahrzeuge weiter unterstützt werden. Auch die Förderung von Ladeinfrastruktur, insbesondere im öffentlichen Bereich, kann die Wahrnehmung von Elektrofahrzeugen für potenzielle Käufer positiv beeinflussen.
Ein weiterer Stellhebel ist das Fahrzeugangebot. Bislang ist die Modellpalette bei alternativen Antrieben noch deutlich eingeschränkt. Die zügige Markteinführung weiterer Modelle könnte die Diffusion zusätzlich beschleunigen. Insbesondere in der Perspektive bis 2030 kann die Verschärfung der EU-weiten Flottengrenzwerte für Neuzulassungen dazu führen, dass Hersteller das Angebot noch schneller erweitern und die Preise für alternative Antriebe weiter senken. Anpassungen bei der Regulierung von PHEV könnten sicherstellen, dass diese, wie im Modell unterstellt, möglichst elektrisch betrieben werden.
Insbesondere mittelfristig, ab 2025 oder 2030, können auch ordnungspolitische Maßnahmen die Diffusion alternativer Antriebe beschleunigen. Die aktuellen Szenarien gehen davon aus, dass konventionelle Benzin- und Dieselfahrzeuge prinzipiell bis 2050 zur Verfügung stehen. Bei hoher technischer Reife von BEV, PHEV und FCEV kann das Verbot des Neukaufs von (reinen) Verbrennungsfahrzeugen die Verbreitung alternativer Antriebe deutlich beschleunigen, ohne Nutzer in ihrem Mobilitätsanspruch deutlich einzuschränken. Die Einführung von Fahrverboten für Verbrenner, beispielsweise in Innenstädten, kann die Attraktivität gerade für Wenigfahrer, die von den niedrigeren Investitionen des Verbrenners profitieren, reduzieren (Plötz et al. 2019).
Insbesondere gegenüber dem Szenario *TN-Strom* sind bei Pkw bis 2030 jedoch weitere Steigerungen des Bestands alternativer Antriebe nur noch moderat möglich. Ursache hierfür ist die Bestandsumwälzung. Bei einer durchschnittlichen Nutzungsdauer von circa 14 Jahren verbleiben bereits heute gekaufte Fahrzeuge bis nach 2030 im Bestand. Im Szenario *TN-Strom* liegt der Anteil alternativer Antriebe im Bestand 2030 bei 26 %, der Anteil bei den Neuzulassungen bei 46 %. Im Jahr 2020 lag der Anteil von Elektrofahrzeugen bei Neufahrzeugen bei 13,6 %, nahezu gleichmäßig auf BEV und PHEV verteilt (Kraftfahrt-Bundesamt 2021). Unklar ist hierbei, wie die Corona-Pandemie das Kaufverhalten beeinflusst hat. Gleichzeitig erfolgte 2020 durch die Kaufprämie bereits eine massive Förderung alternativer Antriebe. Es ist also bereits im vorliegenden Szenario davon auszugehen, dass sich der Anteil neu zugelassener alternativer Antriebe in der zweiten Hälfte des Jahrzehnts mehr als verdreifachen muss.

Bei Nutzfahrzeugen, insbesondere bei den für die Emissionen besonders relevanten schweren Nutzfahrzeugen, ist in den nächsten Jahren zunehmend mit Serienfahrzeugen für alternative Antriebe zu rechnen. In den hier vorgestellten Szenarien werden diese Fahrzeuge circa 2030 wirtschaftlich und diffundieren dann, aufgrund vergleichsweise kurzer Haltedauern, zügig in die Flotte. Zur Beschleunigung der Treibhausgasreduktion lässt sich der Markhochlauf von alternativen Antrieben bei Nutzfahrzeugen im Wesentlichen durch zwei Maßnahmen fördern: zum einen durch die (teilweise) Erstattung von Fahrzeug-

mehrkosten bei der Anschaffung, zum anderen durch einen forcierten Ausbau entsprechender Ladeinfrastruktur beziehungsweise Tankstellen. Beides birgt jedoch insbesondere bei schweren Nutzfahrzeugen das Risiko hoher Fehlinvestitionen, solange aufgrund nicht erreichter Marktreife große Unsicherheit über die Technologien besteht. Zielführend ist es daher, zunächst verstärkt die Fahrzeugentwicklung und das Testen, zum Beispiel in Demonstrationsprojekten und in Pilotflottenversuchen, zu fördern und dann ab Mitte des Jahrzehnts den Markthochlauf mit Förderprämien sowie Infrastruktur zu unterstützen.
Aktuell kündigen verschiedene Hersteller für 2030 an, dass die Neuzulassungen alternativer Antriebe insbesondere auch bei schweren Nutzfahrzeugen deutlich über 10 % liegen sollen. Dies ist aufgrund der aktuellen Flottengrenzwerte jedoch nur notwendig, wenn gleichzeitig die Weiterentwicklung der Dieselfahrzeuge deutlich reduziert wird (Breed 2020). Zusätzlich zu den bestehenden Regelungen für den CO_2-Ausstoß der Neufahrzeugflotte sollten daher verbindliche Ziele für den Anteil alternativer Antriebe an den Neuzulassungen festgelegt werden. Dies würde die Entwicklung alternativer Antriebe durch die Hersteller sicherstellen und die Modellpalette voraussichtlich erweitern. Auch eine Verschärfung der Flottenziele scheint, auf Grundlage der Herstellerankündigungen, möglich. Insgesamt könnte dies die Entwicklung bei Nutzfahrzeugen in den kommenden Jahren beschleunigen.

Für die meisten Anwendungen bei Schiffen und Flugzeugen fehlen zumindest kurzfristig technisch ausgereifte alternative Antriebskonzepte. Das heißt, dass zunächst der Einsatz synthetischer und biogener Kraftstoffe, neben Effizienzsteigerungen, die einzige Reduktionsmaßnahme bleibt. Aufgrund der zunächst noch zu erwartenden Knappheit und hohen Preise dieser Kraftstoffe ist es umso wichtiger diese zunächst möglichst ausschließlich in Bereichen einzusetzen, in denen die direkte Nutzung elektrischer Energie nicht möglich ist. Hier sind aber auch Effizienzsteigerungen durch Verhaltensanpassungen (bei Schiffen beispielsweise Slow steaming, Weatherrouting, verstärkte Autopilotnutzung; bei Flugzeugen beispielsweise das Abschalten von Triebwerken beim Taxiing) oder auch antriebsunabhängige Verbesserungen wie Rumpfbeschichtungen oder Ähnliches möglich, die man analog zur Einhaltung der Abgasbelastung in den Emission Control Areas gesetzlich vorschreiben und damit dem Verbrauch erheblich reduzieren könnte.

3 Anhang

Tabelle 14: Angenommene Fahrzeuginvestitionen nach Antriebsart für Pkw (2020-2050)

Alle Angaben in EUR exklusive Mehrwertsteuer (MwSt.). BEV und PHEV exklusive Batterie.

	2020			2030			2050		
	klein	mittel	groß	klein	mittel	groß	klein	mittel	groß
Benzin	10.700	17.700	31.400	11.300	18.800	33.200	12.500	20.600	36.600
Diesel	12.900	19.900	33.600	13.700	21.100	35.600	15.000	23.200	39.200
PHEV	14.600	21.100	35.600	14.600	21.100	35.600	14.600	21.200	35.600
BEV	10.500	17.000	30.200	10.200	16.600	29.500	10.200	16.600	29.500
CNG	12.400	19.400	33.100	13.200	20.600	35.100	14.500	22.700	38.600
FCEV	34.300	51.000	72.100	17.600	27.100	42.800	15.800	24.300	39.000

Quelle: Eigene Annahmen, basierend auf Pfahl (2013), Plötz et al. (2014), Gnann (2015), Wietschel et al. (2019), Meszler et al. (2016), Zapf et al. (2019)

Tabelle 15: Angenommene Endenergieverbräuche nach Antriebsart für Pkw (2020-2050)

Alle Angaben in kWh/km, für PHEV getrennt nach elektrischem und konventionellem Betrieb

	2020			2030			2050		
	klein	mittel	groß	klein	mittel	groß	klein	mittel	groß
Benzin	0,547	0,669	0,886	0,490	0,590	0,769	0,441	0,531	0,692
Diesel	0,430	0,514	0,634	0,378	0,440	0,530	0,340	0,396	0,477
PHEV el.	0,159	0,198	0,214	0,141	0,177	0,190	0,127	0,159	0,171
PHEV con.	0,501	0,614	0,777	0,449	0,539	0,668	0,404	0,485	0,601
BEV	0,172	0,211	0,227	0,153	0,188	0,203	0,138	0,169	0,183
CNG	0,574	0,702	0,930	0,502	0,605	0,788	0,441	0,531	0,692
FCEV	0,300	0,320	0,336	0,290	0,310	0,329	0,280	0,295	0,320

Quelle: Eigene Annahmen, basierend auf Helms et al. (2011), Wietschel et al. (2019), Meszler et al. (2016)

Tabelle 16: Wartungskosten für Pkw

Alle Angaben in EUR/km

	klein	mittel	groß
Benzin	0,026	0,048	0,074
Diesel	0,027	0,049	0,076
CNG	0,028	0,050	0,078
BEV	0,018	0,033	0,051
PHEV	0,023	0,043	0,066
FCEV	0,028	0,050	0,078

Quelle: Eigene Annahmen, basierend auf Propfe et al. (2012)

Tabelle 17: Angenommene Fahrzeuginvestition nach Antriebsart für Nutzfahrzeuge (2020-2050)

Alle Angaben exklusive Mehrwertsteuer (MwSt.). BEV und PHEV exklusive Batterie. Für die Auswertung wurden einzelne Klassen zusammengefasst.

		Einheit	2020	2030	2050
Diesel	<3,5t	EUR	37.200	42.000	52.500
	3,5-7,5t	EUR	43.100	50.000	62.400
	7,5-12t	EUR	53.800	62.500	78.000
	>12t	EUR	70.200	82.000	102.400
	SZM	EUR	110.200	128.700	160.700
CNG	<3,5t	EUR	40.300	44.100	52.500
	3,5-7,5t	EUR	59.300	55.000	62.400
	7,5-12t	EUR	74.100	68.700	78.000
	>12t	EUR	96.600	90.200	102.400
	SZM	EUR	138.500	141.500	160.700
BEV	<3,5t	EUR	37.600	39.000	39.000
	3,5-7,5t	EUR	54.800	57.800	57.800
	7,5-12t	EUR	67.400	71.200	71.200
	>12t	EUR	90.200	94.800	94.800
	SZM	EUR	132.400	140.500	140.500
PHEV	<3,5t	EUR	37.600	39.000	47.500
	3,5-7,5t	EUR	54.800	57.800	62.400
	7,5-12t	EUR	67.400	71.200	78.000
FCEV	<3,5t	EUR	101.800	60.180	54.700
	3,5-7,5t	EUR	161.500	101.400	93.600
	7,5-12t	EUR	196.500	123.100	113.500
	>12t	EUR	249.400	153.300	140.700
	SZM	EUR	559.600	361.600	336.200
HO-Diesel	>12t	EUR	110.400	96.900	96.900
	SZM	EUR	173.300	152.000	152.000
HO-BEV	>12t	EUR	110.400	96.900	96.900
	SZM	EUR	173.300	152.000	152.000

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

aTabelle 18: Angenommene Endenergieverbräuche nach Antriebsart für Nutzfahrzeuge

Für die Auswertung wurden einzelne Klassen zusammengefasst.

		Einheit	2020	2030	2050
Diesel	<3,5t	kWh/km	0,82	0,72	0,66
	3,5-7,5t	kWh/km	1,31	1,15	1,05
	7,5-12t	kWh/km	1,80	1,58	1,44
	>12t	kWh/km	2,56	2,19	1,90
	SZM	kWh/km	3,03	2,59	2,25
CNG	<3,5t	kWh/km	0,91	0,80	0,73
	3,5-7,5t	kWh/km	1,45	1,27	1,16
	7,5-12t	kWh/km	1,99	1,75	1,59
	>12t	kWh/km	2,85	2,42	2,11
	SZM	kWh/km	3,37	2,87	2,49
BEV	<3,5t	kWh/km	0,32	0,29	0,28
	3,5-7,5t	kWh/km	0,60	0,55	0,53
	7,5-12t	kWh/km	0,84	0,77	0,74
	>12t	kWh/km	1,15	1,06	1,00
	SZM	kWh/km	1,34	1,23	1,17
PHEV elek.	<3,5t	kWh/km	0,32	0,29	0,28
	3,5-7,5t	kWh/km	0,60	0,55	0,53
	7,5-12t	kWh/km	0,84	0,77	0,74
PHEV konv.	<3,5t	kWh/km	0,82	0,72	0,66
	3,5-7,5t	kWh/km	1,31	1,15	1,05
	7,5-12t	kWh/km	1,80	1,58	1,44
FCEV	<3,5t	kWh/km	0,69	0,62	0,56
	3,5-7,5t	kWh/km	1,09	0,99	0,89
	7,5-12t	kWh/km	1,50	1,36	1,22
	>12t	kWh/km	2,22	2,01	1,81
	SZM	kWh/km	2,63	2,37	2,14
HO-Diesel elek.	>12t	kWh/km	1,29	1,17	1,11
	SZM	kWh/km	1,52	1,38	1,31
HO-Diesel konv.	>12t	kWh/km	2,56	2,19	1,90
	SZM	kWh/km	3,03	2,59	2,25
HO-BEV OL	>12t	kWh/km	1,29	1,17	1,11
	SZM	kWh/km	1,52	1,38	1,31
HO-BEV Bat	>12t	kWh/km	1,29	1,17	1,11
	SZM	kWh/km	1,52	1,38	1,31

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

Tabelle 19: Angenommene Wartungskosten nach Antriebsart für Nutzfahrzeuge (2020-2050)

Alle Angaben exklusive Mehrwertsteuer (MwSt.). Für die Auswertung wurden einzelne Klassen zusammengefasst.

		Einheit	2020	2030	2050
Diesel	<3,5t	EUR/km	0,09	0,09	0,09
	3,5-7,5t	EUR/km	0,17	0,17	0,17
	7,5-12t	EUR/km	0,17	0,17	0,17
	>12t	EUR/km	0,16	0,16	0,16
	SZM	EUR/km	0,15	0,15	0,15
CNG	<3,5t	EUR/km	0,10	0,09	0,09
	3,5-7,5t	EUR/km	0,20	0,17	0,17
	7,5-12t	EUR/km	0,19	0,16	0,16
	>12t	EUR/km	0,18	0,16	0,16
	SZM	EUR/km	0,16	0,14	0,14
BEV	<3,5t	EUR/km	0,06	0,03	0,03
	3,5-7,5t	EUR/km	0,11	0,07	0,06
	7,5-12t	EUR/km	0,14	0,08	0,06
	>12t	EUR/km	0,17	0,08	0,06
	SZM	EUR/km	0,18	0,08	0,06
PHEV	<3,5t	EUR/km	0,12	0,09	0,08
	3,5-7,5t	EUR/km	0,22	0,16	0,15
	7,5-12t	EUR/km	0,24	0,16	0,15
FCEV	<3,5t	EUR/km	0,15	0,06	0,04
	3,5-7,5t	EUR/km	0,19	0,09	0,06
	7,5-12t	EUR/km	0,24	0,11	0,08
	>12t	EUR/km	0,32	0,12	0,08
	SZM	EUR/km	0,42	0,14	0,08
HO-Diesel	>12t	EUR/km	0,15	0,15	0,15
	SZM	EUR/km	0,13	0,13	0,13
HO-BEV	>12t	EUR/km	0,19	0,09	0,06
	SZM	EUR/km	0,21	0,09	0,06

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

4 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Modellverbund im Projekt 4
Abbildung 2: Verknüpfung zwischen den Modellen ASTRA-M und ALADIN 5
Abbildung 3: Endenergiepreis für den Verkehr in den treibhausgasneutralen Szenarien 7
Abbildung 4: Endenergiebedarf des Verkehrs nach Verkehrsträgern im Szenario *TN-Strom* 13
Abbildung 5: Endenergiebedarf des Verkehrs nach Energieträgern im Szenario *TN-Strom* 14
Abbildung 6: Personenverkehrsleistung nach Verkehrsmitteln in den THG neutralen Szenarien 15
Abbildung 7: Fahrleistung im Personenverkehr nach Verkehrsmitteln in den THG neutralen Szenarien 16
Abbildung 8: Güterverkehrsleistung nach Verkehrsmitteln in den THG-neutralen Szenarien 17
Abbildung 9: Fahrleistung im Güterverkehr nach Verkehrsmitteln in den THG-neutralen Szenarien 17
Abbildung 10: Entwicklung des Pkw-Bestands bis 2050 im Szenario *TN-Strom* 19
Abbildung 11: Entwicklung des Bestandes leichter Nutzfahrzeuge (<3,5 t) bis 2050 im Szenario *TN-Strom* 20
Abbildung 12: Entwicklung des Bestands mittlerer Nutzfahrzeuge (3,5-12t) bis 2050 im Szenario *TN-Strom* 20
Abbildung 13: Entwicklung des Bestands schwerer Nutzfahrzeuge (> 12t) bis 2050 im Szenario *TN-Strom* 21
Abbildung 14: Endenergiebedarf Pkw bis 2050 im Szenario *TN-Strom* 22
Abbildung 15: Regionaler Endenergiebedarf Pkw im Szenario *TN Strom* 2030 und 2050 23
Abbildung 16: Endenergiebedarf Nutzfahrzeuge bis 2050 im Szenario *TN-Strom* 24
Abbildung 17: Endenergiebedarf leichte Nutzfahrzeuge bis 2050 im Szenario *TN-Strom* 25
Abbildung 18: Endenergiebedarf mittlerer Nutzfahrzeuge bis 2050 im Szenario *TN-Strom* 26
Abbildung 19: Endenergiebedarf schwere Nutzfahrzeuge bis 2050 im Szenario *TN-Strom* 27
Abbildung 20: Regionaler Endenergiebedarf Nfz im Szenario *TN Strom* 2030 und 2050 27
Abbildung 21: Endenergiebedarf des Verkehrs nach Verkehrsträgern im Szenario *TN-PtG/PtL* 31
Abbildung 22: Endenergiebedarf des Verkehrs nach Energieträgern im Szenario *TN-PtG/PtL* 32
Abbildung 23: Entwicklung des Pkw-Bestands bis 2050 im Szenario *TN-PtG/PtL* 34
Abbildung 24: Entwicklung des Bestands leichter Nutzfahrzeuge (<3,5 t) bis 2050 im Szenario *TN-PtG/PtL* 35
Abbildung 25: Entwicklung des Bestands mittlerer Nutzfahrzeuge (3,5-12 t) bis 2050 im Szenario *TN-PtG/PtL* 36
Abbildung 26: Entwicklung des Bestands schwerer Nutzfahrzeuge (>12 t) bis 2050 im Szenario *TN-PtG/PtL* 37
Abbildung 27: Endenergiebedarf Pkw bis 2050 im Szenario *TN-PtG/PtL* 38
Abbildung 28: Regionaler Endenergiebedarf Pkw im Szenario *TN-PtG/PtL* 2030 und 2050 39
Abbildung 29: Endenergiebedarf Nutzfahrzeuge bis 2050 im Szenario *TN-PtG/PtL* 40

Abbildung 30: Endenergiebedarf leichte Nutzfahrzeuge bis 2050 im Szenario *TN-PtG/PtL* 41
Abbildung 31: Endenergiebedarf mittlerer Nutzfahrzeuge bis 2050 im Szenario *TN-PtG/PtL* 42
Abbildung 32: Endenergiebedarf schwere Nutzfahrzeuge bis 2050 im Szenario *TN-PtG/PtL* 43
Abbildung 33: Regionaler Endenergiebedarf Nfz im Szenario *TN-PtG/PtL* 2030 und 2050..... 44
Abbildung 34: Endenergiebedarf des Verkehrs nach Verkehrsträgern im Szenario *TN-H_2*..... 47
Abbildung 35: Endenergiebedarf des Verkehrs nach Energieträgern im Szenario *TN-H_2* 49
Abbildung 36: Entwicklung des Pkw-Bestands bis 2050 im Szenario *TN-H_2*..... 50
Abbildung 37: Entwicklung des Bestands leichter Nutzfahrzeuge (<3,5 t) bis 2050 im Szenario *TN-H_2*..... 51
Abbildung 38: Entwicklung des Bestands mittlerer Nutzfahrzeuge (3,5-12 t) bis 2050 im Szenario *TN-H_2*..... 52
Abbildung 39: Entwicklung des Bestands schwerer Nutzfahrzeuge (>12 t) bis 2050 im Szenario *TN-H_2*..... 53
Abbildung 40: Endenergiebedarf Pkw bis 2050 im Szenario *TN-H_2* 54
Abbildung 41: Regionaler Endenergiebedarf Pkw im Szenario *TN-H_2* 2030 und 2050..... 55
Abbildung 42: Endenergiebedarf Nutzfahrzeuge bis 2050 im Szenario *TN-H_2*..... 56
Abbildung 43: Endenergiebedarf leichte Nutzfahrzeuge bis 2050 im Szenario *TN-H_2*..... 57
Abbildung 44: Endenergiebedarf mittlerer Nutzfahrzeuge bis 2050 im Szenario *TN-H_2*..... 57
Abbildung 45: Endenergiebedarf schwere Nutzfahrzeuge bis 2050 im Szenario *TN-H_2*..... 58
Abbildung 46: Regionaler Endenergiebedarf Nfz im Szenario *TN-H_2* 2030 und 2050 59
Abbildung 47: Endenergiebedarf im Verkehr nach Energieträgern 62

5 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bereitstellungskosten für strombasierte Kraftstoffe 6
Tabelle 2: Beimischungsquote PtG und PtL im Verkehr 6
Tabelle 3: Batteriepreise im Verkehr 8
Tabelle 4: Brennstoffzellenpreise im Verkehr 8
Tabelle 5: Angenommene Entwicklung der Batteriekapazität bei Pkw 9
Tabelle 6: Angenommene Entwicklung der Batteriekapazität bei Nutzfahrzeugen 9
Tabelle 7: Verkehrsaufkommen im Luft- und Hochseeverkehr bis 2050, basierend auf (Pfluger et al. 2017) 18
Tabelle 8: Energieverbrauch aller Verkehrsträger ohne Pkw und Nutzfahrzeuge im Szenario *TN-Strom* unterteilt nach Kraftstoffen und Verkehrsträgern 29
Tabelle 9: Energieverbrauch aller Verkehrsträger ohne Pkw und Nutzfahrzeuge im Szenario *TN-Strom* unterteilt nach Kraftstoffen 29
Tabelle 10: Energieverbrauch aller Verkehrsträger ohne Pkw und Nutzfahrzeuge im Szenario *TN-PtG/PtL* unterteilt nach Kraftstoffen und Verkehrsträgern 45
Tabelle 11: Energieverbrauch aller Verkehrsträger ohne Pkw und Nutzfahrzeuge im Szenario *TN-PtG/PtL* unterteilt nach Kraftstoffen 46
Tabelle 12: Energieverbrauch aller Verkehrsträger ohne Pkw und Nutzfahrzeuge im Szenario *TN-H_2* unterteilt nach Kraftstoffen und Verkehrsträgern 60
Tabelle 13: Energieverbrauch aller Verkehrsträger ohne Pkw und Nutzfahrzeuge im Szenario *TN-H_2* unterteilt nach Kraftstoffen 61
Tabelle 14: Angenommene Fahrzeuginvestitionen nach Antriebsart für Pkw (2020-2050) 66
Tabelle 15: Angenommene Endenergieverbräuche nach Antriebsart für Pkw (2020-2050) 66
Tabelle 16: Wartungskosten für Pkw 66
Tabelle 17: Angenommene Fahrzeuginvestition nach Antriebsart für Nutzfahrzeuge (2020-2050) 67
aTabelle 18: Angenommene Endenergieverbräuche nach Antriebsart für Nutzfahrzeuge 68
Tabelle 19: Angenommene Wartungskosten nach Antriebsart für Nutzfahrzeuge (2020-2050) 69

6 Literatur

BDEW (2019): Gaspreisanalyse Juli 2019. Berlin: Bundesverband der Gas- und Wasserwirtschaft.

Bopst, J.; Herbener, R.; Hölzer-Schopohl, O.; Lindmaier, J.; Myck, T.; Weiß, J. (2019): Umweltschonender Luftverkehr. lokal-national-international. Texte 130/2019. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.

Breed, A. (2020): Impact of the CO2 Emission Targets on the Market Penetration of Zero-Emission Heavy-Duty Vehicles in Europe. Master's Thesis. Hamburg: Technische Universität Hamburg-Harburg; Fraunhofer ISI.

Bullerdiek, N.; Kaltschmitt, M. (2020): Analyse und Bewertung vorhandener und alternativer Lenkungsinstrumente zur Markteinführung erneuerbarer Flugkraftstoffe. In: Zeitschrift für Energiewirtschaft, 44 (2), S. 119–140.

Crist, P. (2009): Greenhouse Gas Emissions Reduction Potential from International Shipping. Discussion Paper No. 2009-11. Joint Transport Research Centre of the OECD and the International Transport Forum.

Fleiter, T. (2020): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Strompreise. Unveröffentliches Dokument. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.

Gnann, T. (2015): Market diffusion of plug-in electric vehicles and their charging infrastructure. Stuttgart: Fraunhofer-Verl.

Göckeler, K.; Hacker, F.; Mottschall, M.; Blanck, R.; Görz, W.; Kasten, P.; Bernecker, T.; Heinzelmann, J. (2020): Status quo und Perspektiven alternativer Antriebstechnologien für den schweren Straßengüterverkehr. Erster Teilbericht des Forschungs- und Dialogvorhabens "StratES: Strategien für die Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs". Gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU). Berlin: Öko-Institut; Hochschule Heilbronn.

Halim, R.; Kirstein, L.; Merk, O.; Martinez, L. (2018): Decarbonization Pathways for International Maritime Transport: A Model-Based Policy Impact Assessment. In: Sustainability, 10 (7), S. 2243.

Helms, H.; Jöhrens, J.; Hanusch, J.; Höpfner, U.; Lambrecht, U.; Pehnt, M. (2011): UMBReLA. Umweltbilanzen Elektromobilität. Ergebnisbericht gefördert durch das Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) im Rahmen des FuE-Programms "Förderung von Forschung und Entwicklung im Bereich Elektromobilität" Förderkennzeichen 16EM0040. Heidelberg: Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (IFEU).

Helms, H.; Kämper, C.; Biemann, K.; Lambrecht, U.; Jöhrens, J.; Meyer, K. (2019): Klimabilanz von Elektroautos. Einflussfaktoren und Verbresserungspotenzial. Erstellt im Auftrag von Agora Verkehrswende. Durchführung ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH. Berlin: Agora Verkehrswende.

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.

IMO (2020a): Energy Efficiency Measures. Online verfügbar unter http://www.imo.org/en/ourwork/environment/pollutionprevention/airpollution/pages/technical-and-operational-measures.aspx, zuletzt geprüft am 30.06.2020.

IMO (2020b): Sulphur oxides (SOx) and Particulate Matter (PM) – Regulation 14. Online verfügbar unter http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Sulphur-oxides-(SOx)-%E2%80%93-Regulation-14.aspx, zuletzt geprüft am 30.06.2020.

Kraftfahrt-Bundesamt (2021): Jahresbilanz Neuzulassungen. Zahlen des Jahres 2020 im Überblick. Online verfügbar unter https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/jahresbilanz/jahresbilanz_inhalt.html;jsessionid=D1D0376A12561623EAB01D6AB3ADAE55.live11313?nn=2594996, zuletzt geprüft am 18.06.2021.

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.

Meszler, D.; German, J.; Mock, P.; Bandivadekar, A. (2016): CO2 reduction technologies for the European car and van fleet, a 2025-2030 assessment. Methodology and summary of compliance costs for potential EU CO2 standards. ICCT.

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.

Münzel, C.; Plötz, P.; Sprei, F.; Gnann, T. (2019): How large is the effect of financial incentives on electric vehicle sales? – A global review and European analysis. In: Energy Economics, 84, S. 104493.

MWV (2020): Monatliche Verbraucherpreise für Mineralölprodukte 2005-2020 [€-Cent/Liter]. Online verfügbar unter https://www.mwv.de/statistiken/verbraucherpreise/, zuletzt geprüft am 03.04.2020.

Pagenkopf, J.; Schirmer, T.; Böhm, M.; Streuling, C.; Herwartz, S. (2020): Marktanalyse alternativer Antriebe im deutschen Schienenpersonennahverkehr. Auftraggeber: NOW GmbH. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt.

Pfahl, S. (2013): Alternative Antriebskonzepte: Stand der Technik und Perspektiven: Die Sicht der Automobilindustrie. In: Jochem, P. (Hrsg.): Alternative Antriebskonzepte bei sich wandelnden Mobilitätsstilen. Tagungsbandbeiträge vom 08. und 09. März 2012 am KIT, Karlsruhe. Hannover: Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek; KIT Scientific Publishing, S. 81–108.

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).

Plötz, P.; Axsen, J.; Funke, S. A.; Gnann, T. (2019): Designing car bans for sustainable transportation. In: Nature Sustainability, 2 (7), S. 534–536.

Plötz, P.; Gnann, T.; Kühn, A.; Wietschel, M. (2014): Markthochlaufszenarien für Elektrofahrzeuge. Langfassung. Studie im Auftrag der acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften und der Arbeitsgruppe 7 der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE). Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI).

Propfe, B.; Redelbach, M.; Santini, D. J.; Friedrich, H. (2012): Cost analysis of Plug-in Hybrid Electric Vehicles including Maintenance & Repair Costs and Resale Values. EVS26. Los Angeles.

Sensfuss, F.; Deac, G.; Bernath, C.; Herbst, A.; Fleiter, T.; Krail, M.; Brugger, H.; Mellwig, P.; Brischke, L.; Blömer, S.; Rettenmaier, N.; Köppen, S.; Dittrich, M. (2020): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Rahmendaten. Karlsruhe: Fraunhofer ISI; Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (IFEU).

Timmerberg, S.; Bullerdiek, N.; Kaltschmitt, M.; Gnann, T.; Neumann, F.; Wietschel, M. (2018): Import von Stromkraftstoffen für den Verkehr - Lkw, Binnen-/Seeschiffe, Flugzeuge. Studie im Rahmen der wissenschaftlichen Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie. Unveröffentlichte Studie. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.

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.

Wietschel, M.; Timmerberg, S.; Ashley-Belbin, N. (2019): Klimabilanz, Kosten und Potenziale verschiedener Kraftstoffarten und Antriebssysteme für Pkw und Lkw. Endbericht. Gefördert von Biogasrat+ e.V. Karlsruhe: Fraunhofer ISI; Technische Universität Hamburg-Harburg; IREES GmbH.

Zapf, M.; Pengg, H.; Bütler, T.; Bach, C.; Weindl, C. (2019): Kosteneffiziente und nachhaltige Automobile. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.