

CLIMATE CHANGE

17/2025

Teilbericht

Lenkungswirkung von Endenergiepreisen im Verkehrssektor

Eine Analyse ausgewählter Politikinstrumente mit dem
Verkehrs- und Emissionsmodell TEMPS

von:

Konstantin Kreye, Inia Steinbach
Öko-Institut, Berlin

Herausgeber:
Umweltbundesamt

CLIMATE CHANGE 17/2025

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für
Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und
Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3720 43 101 0
FB001618

Teilbericht

Lenkungswirkung von Endenergiepreisen im Verkehrssektor

Eine Analyse ausgewählter Politikinstrumente mit dem
Verkehrs- und Emissionsmodell TEMPS
Im Rahmen des Projektes „Der Beitrag ökonomischer
Instrumente zur Erreichung der Klimaschutzziele: Die
Rolle der staatlich bestimmten Energiepreisbestandteile
im Instrumenten-Mix“

von

Konstantin Kreye, Inia Steinbach
Öko-Institut, Berlin

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:

Öko-Institut e.V.
Borkumstraße 2
13189 Berlin

Abschlussdatum:

Mai 2024

Fachliche Begleitung:

Fachgebiet I 1.4 Wirtschafts- und sozialwissenschaftliche Umweltfragen, sozial-
ökologischer Strukturwandel, nachhaltiger Konsum
Dr. Benjamin Lünenbürger

DOI:

<https://doi.org/10.60810/openumwelt-7591>

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, April 2025

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Lenkungswirkung von Endenergiepreisen im Verkehrssektor

Der Verkehrssektor konnte die im Gesetz definierten Emissionsziele nicht einhalten und wird aller Voraussicht nach das Ziel der Treibhausgasneutralität 2045 ohne weiteres politisches Handeln verfehlen. Es besteht akuter klimapolitischer Handlungsbedarf geeignete zusätzliche Klimaschutzinstrumente auf den Weg zu bringen oder auch bereits bestehende Instrumente anzupassen. Diese Studie fokussiert auf die Lenkungswirkung staatlich bestimmter Energiepreisbestandteile wie die Energie- oder Stromsteuer oder der CO₂-Preis.

Mithilfe des am Öko-Institut entwickelten Modells TEMPS (**T**ransport **E**missions and **P**olicy **S**cenarios) werden in Szenarien vier verschiedene alternative Ausgestaltungen staatlich bestimmter Energiepreisbestandteile hinsichtlich ihrer Lenkungswirkung untersucht. Ziel der Analyse ist es die verschiedenen Ausgestaltungsmöglichkeiten hinsichtlich der Wirkung auf Verkehrsnachfrage und Verlagerung, Neuzulassungsstruktur und Treibhausgasemissionen miteinander zu vergleichen und so die klimapolitische Lenkungswirkung von CO₂- und Energiepreisen besser verstehen und einordnen zu können.

Die Ergebnisse zeigen, dass die deutliche Erhöhung der CO₂- bzw. der Energiepreise in keiner der untersuchten Szenarien ausreicht, um die nationalen sektorspezifischen Klimaschutzziele bis 2030 oder die Klimaneutralität 2045 zu realisieren. Ergänzende Sensitivitätsanalysen zeigen, dass eine schnellere Elektrifizierung des Pkw-Bestandes mittels eines beim Pkw-Kauf wirkenden Malus deutlich beschleunigt werden kann. Damit wird die Antriebswahl stärker beeinflusst als durch direkte Erhöhung der Preise für fossile Kraftstoffe. Die Erhöhung des CO₂-Preises oder die Anpassung der Energiebesteuerung wirken hingegen mittelfristig vor allem auf die Verkehrsverlagerung und -vermeidung, insbesondere im Personenverkehr. Die (moderate) Anpassung der Stromsteuer hat von allen Szenarien und Sensitivitäten die kleinste Minderungswirkung.

Abstract: Steering effect of final energy prices in the transport sector

The transport sector was unable to meet the emission targets laid down in legislation and is likely to miss the target of greenhouse gas neutrality by 2045 without further political action. There is an acute need for climate policy action on the part of politicians to introduce suitable additional climate policy instruments or to adapt existing instruments. This study focuses on the steering effect of the state-imposed components of the energy price such as the energy or electricity tax or the carbon price.

Using the TEMPS (**T**ransport **E**missions and **P**olicy **S**cenarios) model developed at Oeko-Institut, four different alternative designs of state-imposed components of the energy price are analysed in scenarios with regard to their steering effect. The aim of the analysis is to compare the various design options in terms of their impact on transport demand and modal shift, the structure of new registrations and greenhouse gas emissions, and thus to better understand and categorise the steering effect of carbon and energy prices with regard to climate policy.

The results show that the significant increase in carbon and energy prices in none of the scenarios analysed is sufficient to achieve the national sector-specific climate protection targets by 2030 or climate neutrality by 2045. Supplementary sensitivity analyses show that a faster electrification of the passenger car fleet can be substantially accelerated by means of a premium applied to the purchase of passenger cars. This has a stronger influence on the choice of drive than a direct increase in the price of fossil fuels. Increasing the carbon price or adjusting energy taxation have a medium-term effect primarily on modal shift and traffic avoidance, especially in passenger transport. The (moderate) adjustment of the electricity tax has the smallest reduction effect of all scenarios and sensitivities.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	8
Tabellenverzeichnis.....	8
Verzeichnis Text Box.....	9
Abkürzungsverzeichnis.....	10
Zusammenfassung.....	12
Summary.....	16
1 Hintergrund.....	20
2 Das Modell TEMPS und die Lenkungswirkung von Energiepreisen.....	22
2.1 Nutzungsprofile und Fahrzeugkonfigurationen.....	22
2.2 Neuzulassungsmodell.....	24
2.2.1 Logit-Modell für Pkw.....	25
2.2.2 Neuzulassungsstruktur für Nutzfahrzeuge.....	26
2.2.3 Energieinfrastruktur.....	26
2.3 Bestandsmodellierung.....	27
2.4 Verkehrsnachfrage.....	27
2.4.1 Verkehrsverlagerung im Personenverkehr.....	28
2.4.2 Verkehrsverlagerungen im Güterverkehr.....	29
2.5 Endenergieverbrauch und Treibhausgasemissionen.....	30
3 Analysen zur Lenkungswirkung von Endenergiepreisänderungen.....	31
3.1 Ausgestaltung der Szenarien (S).....	31
3.1.1 CO ₂ -Preisvariationen BEHG/ETS2 (Szenarien S1 + S2).....	31
3.1.2 Energiesteueranpassung für fossile Kraftstoffe (Szenario S3).....	33
3.1.3 Anpassung der Strombesteuerung.....	34
3.1.4 Übersicht über die Szenarien.....	35
3.2 Ergebnisse/Lenkungswirkung der Szenarien.....	37
3.2.1 CO ₂ -Preisvariationen BEHG/ETS2 (Szenarien S1 + S2).....	37
3.2.2 Energiesteueranpassung (Szenario S3).....	43
3.2.3 Anpassung der Strombesteuerung.....	48
3.2.4 Zusammenfassung und Vergleich.....	50
3.3 Wechselwirkungen mit anderen Politikinstrumenten.....	51
3.3.1 Pkw Flottenzielwerte.....	51
3.3.2 CO ₂ -abhängige Lkw-Maut.....	51
3.4 Sensitivitätsanalyse: Einführung eines Malus.....	52

4	Fazit und Handlungsempfehlungen.....	57
5	Quellenverzeichnis	59

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Beispiel TCO für drei Antriebe eines Pkw-Profiles bei Neuanschaffung.....	25
Abbildung 2:	Energiepreisbestandteile aller Szenarien im Jahr 2030 am Beispiel für private Pkw	36
Abbildung 3:	Änderung der Energiepreise gegenüber der Referenz im Jahr 2030	37
Abbildung 4:	Neuzulassungsanteile im Referenzszenario	38
Abbildung 5:	Personenverkehrsnachfrage in den Szenarien S1 und S2	39
Abbildung 6:	Neuzulassungsanteile von Lkw > 12 Tonnen in den Szenarien S1 und S2	41
Abbildung 7:	Güterverkehrsleistung in den Szenarien S1 und S2.....	42
Abbildung 8:	THG-Emissionen in den Szenarien S1 und S2	43
Abbildung 9:	Vergleich der Pkw Neuzulassungsanteile in Szenario S3.....	44
Abbildung 10:	Vergleich der Verkehrsleistung im Personenverkehr in Szenario S3	45
Abbildung 11:	Neuzulassungsanteile Lkw > 12 Tonnen in Szenario S3	46
Abbildung 12:	Güterverkehrsleistung in Szenario S3.....	47
Abbildung 13:	THG-Emissionen in Szenario S3	48
Abbildung 14:	Neuzulassungsanteile Pkw in Szenarien V1 und V2	54
Abbildung 15:	THG-Emissionen in Szenarien V1 und V2	55

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	THG-Emissionen nach Jahren, Vergleich der Szenarien (in Mio. tCO ₂ -Äq).....	13
Table 1:	GHG emissions in years, comparison of scenarios (in Mt CO ₂ eq)	17
Tabelle 2:	Mögliche Antriebsoptionen in TEMPS.....	23
Tabelle 3:	Größenklassen für Pkw und Lkw	23
Tabelle 4:	Kostenbestandteile der TCO.....	24
Tabelle 5:	Direkte Preiselastizitäten im Personenverkehr	28
Tabelle 6:	Verlagerungen im Personenverkehr von Spalte zu Zeile.....	29
Tabelle 7:	Definition der Szenarien	31
Tabelle 8:	CO ₂ -Preispfad in Szenarien Referenz, S1 und S2*	32
Tabelle 9:	Energiesteuerpfad für fossile Kraftstoffe in Szenario S3*	33
Tabelle 10:	Stromsteuerpfad in Szenario Ref und S4.....	34
Tabelle 11:	Pkw Bestand in Mio. Fahrzeugen in Szenario Referenz, S1 und S2 im Jahr 2030.....	39
Tabelle 12:	THG-Emissionen in den Szenarien S1 und S2 (in Mio. t CO ₂ -Äq)	43

Tabelle 13:	Pkw-Bestand im Jahr 2030 im Szenario S3 (in Mio. Fahrzeugen)	44
Tabelle 14:	THG-Emissionen in Szenario S3 und S2 (in Mio. tCO ₂ -Äq).....	48
Tabelle 15:	Differenz der Personenverkehrsleistung im Szenario S4 gegenüber der Referenz (in Pkm).....	49
Tabelle 16:	nationale CO ₂ -Emissionen in Mio. Tonnen CO ₂ Äquivalente in Szenario S4	49
Tabelle 17:	Induzierte Anpassungsreaktionen für Kraftstoffe im Bereich Verkehr differenziert nach ausgewählten Verkehrsträgern für das Jahr 2030.....	50
Tabelle 18:	Ausgestaltung Malus in Szenarien V1 und V2	53
Tabelle 19:	Pkw Bestand im Jahr 2030 in Szenarien V1 und V2 (in Mio. Fahrzeugen)	54
Tabelle 20:	THG-Emissionen nach Jahren in Szenarien V1, V2 sowie S2 und S3 (in tCO ₂ -Äq)	56
Tabelle 21:	THG-Emissionen nach Jahren, Vergleich der Szenarien (in Mio. tCO ₂ -Äq).....	57

Verzeichnis Text Box

Text Box 1: Beispiel TCO bei Pkw für eine Neuanschaffung im Jahr 2030 im Modell TEMPS.....	24
Text Box 2: Beispiel Verlagerung von Pkw auf andere Verkehrsträger.....	29
Text Box 3: Induzierte Anpassungsreaktion	50

Abkürzungsverzeichnis

Afa	Abschreibungen
Äq	Äquivalente
BEHG	Brennstoffemissionshandelsgesetz
BEV	batterieelektrische Fahrzeuge (battery electric vehicle)
BIP	Bruttoinlandsprodukt
bspw.	beispielsweise
CO₂	Kohlenstoffdioxid
ct	Cent
Destatis	Statistisches Bundesamt
E-Mobilität	Elektromobilität
ETD	Energy Taxation Directive
ETS	Emission Trading System
EU	Europäische Union
FCEV	Brennstoffzellenantrieb (fuel cell electric vehicle)
g	Gramm
GJ	Gigajoule
Int.	international
Kfz	Kraftfahrzeug
KiD	Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland
km	Kilometer
KSG	Klimaschutzgesetz
kWh	Kilowattstunde
Lkw	Lastkraftwagen
LNF	leichte Nutzfahrzeuge
MiD	Mobilität in Deutschland
Mio.	Millionen
MIV	motorisierter Individualverkehr
MJ	Megajoule
MKS	Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie
Mrd.	Milliarden
MWMS	Mit weiteren Maßnahmen Szenario
nat.	national
ÖPNV	öffentlicher Personennahverkehr
PHEV	Plug-In-Hybrid
Pkm	Personenkilometer
Pkw	Personenkraftwagen
Ref	Referenz

S	Szenario
t	Tonnen
tCO₂	Tonnen Kohlendioxid
THG	Treibhausgase
TCO	Gesamtkostenbetrachtung (Total Cost of Ownership)
TEMPS	Transport Emissions and Policy Scenarios
THG	Treibhausgase
tkm	Tonnenkilometer
TREMOD	Transport Emission Model

Zusammenfassung

Der Verkehrssektor konnte die im Gesetz definierten Emissionsziele weder im Jahr 2021, 2022 noch im Jahr 2023 einhalten. Mit dem Inkrafttreten der zweiten Klimaschutzgesetz-Novelle (KSG-Novelle) müssen die Jahresemissionsmengen nur noch sektorübergreifend erfüllt werden. Das Ziel der Treibhausgasneutralität 2045 für den Verkehrssektor bleibt jedoch bestehen. Zudem unterliegen die Emissionen des Verkehrssektors der Europäischen Klimaschutzverordnung und müssen demnach in Deutschland um 50 % gegenüber 2005 sinken. Dieses Minderungsziel sieht einen vergleichbaren Minderungsbeitrag zu den im KSG definierten Zielen des Verkehrssektors vor. Das zeigt: eine grundlegende Transformation des Verkehrssektors ist zwingend notwendig. Bereits bestehende Klimaschutzinstrumente reichen nicht aus. Daher besteht dringender politischer Handlungsbedarf, um geeignete Klimaschutzinstrumente auf den Weg zu bringen.

Neben den bereits beschlossenen Instrumenten wie bspw. der Verschärfung der EU-Flottenzielwerte für Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge oder der Einführung einer CO₂-Komponente bei der Lastkraftwagen-Maut sind weitere Instrumente nötig, um die Jahresemissionsmengen zu senken und die Lücke zum Emissionsbudget des Verkehrssektors zu schließen. Neben der Etablierung neuer Instrumente kann auch auf die Anpassung bereits bestehender Instrumente zurückgegriffen werden. Mögliche Anknüpfungspunkte können hier beispielsweise staatlich bestimmte Energiepreisbestandteile wie die Energie- oder Stromsteuer oder aber der CO₂-Preis sein. Diese Analyse widmet sich daher der Lenkungswirkung staatlich bestimmter Energiepreisbestandteile.

Methodisches Vorgehen

Mit Hilfe des am Öko-Institut entwickelten Modell TEMPS wird die Lenkungswirkung staatlich bestimmter Energiepreisbestandteile untersucht. Das Modell ermöglicht den Endenergiebedarf, die Flottenzusammensetzung, die Verkehrsnachfrage und die Treibhausgasemissionen des Verkehrs für unterschiedliche Szenarien und unter Berücksichtigung von politischen und ökonomischen Rahmenbedingungen zu quantifizieren.

Kernbestandteil des Modells ist die Marktmodellierung für Straßenfahrzeuge (Pkw, LNF und Lkw) mittels eines detaillierten Neuzulassungs- und Bestandsmodells. Im Modell wird die Kaufentscheidung für repräsentative Nutzungsprofile unter Berücksichtigung von technischen, ökonomischen sowie regulatorischen Bedingungen simuliert. Für alle übrigen Verkehrsträger (Schienenverkehr, Schifffahrt, Luftfahrt, Busse, Motorräder, Fahrräder) werden Annahmen über Antriebe und ihre Effizienzentwicklung hinterlegt.

In allen Szenarien werden regulatorische Rahmenbedingungen und Marktentwicklungen auf nationaler und europäischer Ebene berücksichtigt, beispielsweise durch den Ausbau der Ladeinfrastruktur, Steuern, Mautgebühren oder Grenzwerte, die eingehalten werden müssen. Darüber hinaus ist die Wirtschaftlichkeit von Fahrzeugen auch von globalen Trends beeinflusst, wie zum Beispiel die Entwicklung der Rohölpreise oder der Batteriepreise, die ebenfalls einbezogen werden.

Die Änderungen der Endenergiepreise beeinflussen unter anderem die Kaufentscheidung. Mit Hilfe von vier Szenarien wird dargestellt, wie sich konkrete Energiepreisänderungen auf die Verkehrsleistung, die Flottenzusammensetzung und schließlich die THG-Emissionen im nationalen Verkehr auswirken. Als Referenz dient das „Mit Weiteren Maßnahmen Szenario“ (MWMS) des Projektionsberichts 2023 (Harthan et al. 2023). Das MWMS-Szenario beinhaltet alle bereits beschlossenen Klimaschutzmaßnahmen und -instrumente (Stand 31. August 2022),

sowie das Deutschlandticket und die Erweiterung der Lkw-Maut um eine CO₂-abhängige Komponente in Höhe von 200 Euro/tCO₂.

Ausgestaltung der Szenarien

Die vier untersuchten Szenarien stellen unterschiedliche Ausgestaltungen der Energiepreisbestandteile dar. In den Szenarien S1 und S2 wird untersucht, wie sich eine Halbierung bzw. eine Verdopplung des CO₂-Preises gegenüber der Referenz im Verkehrssektor auswirken würde. Hierbei wird im Rahmen von „Was-wäre-Wenn-Szenarien“ angenommen, dass mit Einführung des EU-ETS2 im Jahr 2027 eine Angleichung zum ETS1¹ stattfindet, um die Lenkungswirkung einer solchen Veränderung zu erörtern. Die Preispfade in S1 und S2 entsprechen also ab 2027 der Halbierung bzw. der Verdopplung des CO₂-Preises des EU ETS1 in der Referenzentwicklung. Im Szenario S3 wird eine Anhebung des Energiesteuersatzes für Diesel, Autogas und Methan ab 2024 phasenweise bis 2026 auf die Höhe des Energiegehalts von Benzin untersucht. Zusätzlich wird ab 2026 ein Inflationsausgleich eingeführt. Die jährliche Inflation führt bislang zu einer sukzessiven Abnahme der realen Steuerlast der Energiebesteuerung. Um diese Abnahme zu verhindern und die realen Steuersätze konstant zu halten, werden ab dem Jahr 2024 die nominalen Steuersätze gemäß der jährlichen Inflationsrate erhöht. Im Szenario S4 erfolgt eine Senkung der Stromsteuer gemäß dem Vorschlag für die Energy Tax Directive. Demnach wird die Stromsteuer auf ein Minimum von 0,054 ct/kWh abgesenkt.

Ergebnisse

In der Referenz wirken bereits eine Vielzahl an Politikinstrumenten im Verkehrssektor, die einen erheblichen Beitrag zur Transformation und der CO₂-Minderung im Verkehrssektor im Zeitverlauf leisten. Eine detaillierte Diskussion, der in der Referenz bereits wirkenden Instrumenten- und Maßnahmenbündel, kann dem Projektionsbericht der Bundesregierung für das Jahr 2023 entnommen werden.

Die folgende Tabelle 1 fasst die Ergebnisse der projizierten THG-Emissionen in den verschiedenen Szenarien zusammen.

Tabelle 1: THG-Emissionen nach Jahren, Vergleich der Szenarien (in Mio. tCO₂-Äq)

Szenario	Kurzbeschreibung	2025	2030	2035	2040	2045
Referenz		144,3	107,6	71,6	34,9	14,6
S1	niedriger CO ₂ -Preis	144,3	110,4	74,7	35,5	14,6
S2	hoher CO ₂ -Preis	144,3	100,7	64,3	31,8	13,7
S3	angepasste Energiesteuer	141,7	101,2	63,7	32,0	14,0
S4	minimale Stromsteuer	144,1	107,3	70,8	34,0	14,3
V1	Malus, Variante 1	144,2	103,5	64,4	29,7	12,4
V2	Malus, Variante 2	144,2	101,3	60,9	27,6	11,5

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

¹ Emissions Trading System: EU-weites „Cap-and-Trade“- System zur Reduktion der CO₂-Emissionen insbesondere für die Sektoren Energiebereitstellung und Industrie.

Ein höherer CO₂-Preis wirkt sich positiv auf die Verlagerung zwischen Verkehrsträgern aus, reicht aber nicht aus, um die Sektorziele zu erfüllen.

Die Änderung des CO₂-Preises (S1 & S2) wirkt auf die Betriebskosten von Pkw und Lkw, allerdings auf unterschiedliche Weise. Dies hat sowohl Auswirkungen auf die Verlagerung von Verkehrsleistung zwischen Verkehrsträgern als auch auf die Kaufentscheidung. Bei Pkw sorgen bereits verschärfte Flottenzielwerte für finanzielle Anreize für den Kauf emissionsfreier Antriebe. Dadurch wird der zusätzliche Kosteneffekt durch den CO₂-Preis teilweise überdeckt. Die durch den CO₂-Preis veränderten Kraftstoffpreise wirken sich auch auf den Modal Split der Personenverkehrsnachfrage aus. Infolgedessen wird mehr Verkehr auf den Umweltverbund verlagert. Im Güterverkehr wirkt der CO₂-Preis auf einen großen Teil der fast ausschließlich aus Dieselfahrzeugen bestehenden Flotte, wie auch die CO₂ abhängige Mautkomponente. Allerdings ist der Markthochlauf von BEVs maßgeblich vom Ladeinfrastrukturausbau abhängig. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass die steigenden CO₂-Preise auf fossile Kraftstoffe den Markthochlauf für Ladeinfrastruktur ankurbeln.

Durch den hohen CO₂-Preis (S2) werden die höchsten Emissionsminderungen von - 6,9 Mio. tCO₂-Äq (kumuliert bis 2030 rund 30,4 Mio. tCO₂-Äq) im Jahr 2030 gegenüber der Referenz erreicht, während durch die Energiesteueranpassung (S3) -6,4 Mio. tCO₂-Äq (kumuliert bis 2030 rund 32,5 Mio. tCO₂-Äq) Minderungen erzielt werden.

Die Wirkung der CO₂-Preise nimmt mit einer zunehmenden Elektrifizierung der Flotte ab. Dies gilt sowohl für Pkw als auch für LKW. Es zeigt sich auch: die zusätzliche Lenkungswirkung von hohen CO₂-Preisen allein reicht nicht aus, um die Sektorziele im Verkehr zu erreichen. Es bedarf weiterer Instrumente.

Die Erhöhung der Energiesteuer und die Einführung eines Inflationsausgleichs für fossile Kraftstoffe wirkt sich positiv auf die Verlagerung zwischen Verkehrsträgern aus.

Die Lenkungswirkung der Erhöhung der Energiesteuer und die Einführung eines Inflationsausgleichs wirkt ähnlich wie die Erhöhung von CO₂-Preisen. Während steigende CO₂-Preise auch nach 2030 wirken und zu Verlagerungen führen, wirkt nach der vollständigen Angleichung der Energiebesteuerung nur noch der Inflationsausgleich zusätzlich. Dadurch hat der CO₂-Preis langfristig gesehen eine stärkere Wirkung als die Energiesteueranpassung und erreicht im Jahr 2045 die niedrigsten Emissionen.

Sowohl durch den hohen CO₂-Preis als auch durch die Anpassung der Energiebesteuerung findet darüber hinaus im Personenverkehr eine starke Verlagerung auf andere Verkehrsträger statt, insbesondere auf die Schiene.

Die Anpassung der Stromsteuer zeigt nur eine geringe Lenkungswirkung

Durch die Anpassung der Strombesteuerung und das Einführen eines Inflationsausgleichs sinkt der Strompreis um sieben Prozent gegenüber der Referenz im Jahr 2030. Die Neuzulassungsstruktur der Lkw und Pkw verändert sich im Zuge dessen jedoch nur marginal. Auf die Personen- und Güterverkehrsleistung hat die Stromsteueranpassung nur einen geringen Effekt.

Ein Instrumentenmix ist notwendig

Eine Kombination an Instrumenten und Maßnahmen mit verschiedenen Wirkungsmechanismen und unterschiedlichem Fokus hilft, die Emissionen schneller und deutlicher zu senken und somit die Klimaschutzziele im Verkehrssektor zu erreichen. Dabei entfalten Änderungen der Energiepreise durch Anpassung staatlich bestimmter Energiepreisbestandteile in Kombination mit weiteren Instrumenten eine gute Wirkung. Im Personenverkehr spielen insbesondere die Flottenzielwerte der Pkw eine entscheidende Rolle, die für Planbarkeit und ein Angebot an emissionsfreien Fahrzeugen durch Signale an die Industrie sorgen und somit Alternativen

bereitstellen, die nicht von steigenden CO₂-Preisen betroffen sind, sorgen, Im Güterverkehr hat die CO₂-abhängige Lkw Maut mit 200 Euro/tCO₂ eine starke preisliche Lenkungswirkung auf die Neuzulassungen der Lkw. Die Analyse zeigt u.a. die Wirkung einer Maluszahlung für stark emittierende Pkw bei Neuzulassung mit unterschiedlicher Ausgestaltung. Der Malus wirkt stark auf die Neuzulassungsstruktur der Pkw und führt zu einer starken Beschleunigung der Elektrifizierung der Flotte. Mithilfe des Malus können so bis 2030 rund 4,1 Mio. tCO₂-Äq (bei einer weniger ambitionierten Ausgestaltung, V1) und 6,3 Mio. tCO₂-Äq bei einer höheren Ausgestaltung (V2) im Jahr 2030 eingespart werden. Diese Minderung wird durch die Unterschiede in der Antriebsverteilung der neu zugelassenen Pkw realisiert, während die Anpassung der Energiekosten in der Nutzungsphase des Fahrzeugs, bspw. durch eine Anpassung der Energiebesteuerung oder des CO₂-Preises, vermehrt auf Verlagerung und Vermeidung von Verkehren abzielen.

Welchen Einfluss haben Anpassungen staatlich bestimmter Energiepreisbestandteile im Verkehrssektor und wie groß ist ihre Lenkungswirkung?

Die Ergebnisse zeigen: in keinem der skizzierten Szenarien reicht die Instrumentenausgestaltung aus, um die nationalen sektorspezifischen Klimaschutzziele bis 2030 oder die Klimaneutralität 2045 zu realisieren. Die Analysen macht deutlich, es braucht neben der Anpassung von Energiepreisbestandteilen z.B. ein hoher CO₂-Preis, weitere, zusätzliche Instrumente für eine schnellere Elektrifizierung. Die Einführung eines Malus kann dies beschleunigen. Dieses Instrument beeinflusst die Antriebswahl stärker als die direkte Erhöhung der Preise für fossile Kraftstoffe. Die Erhöhung des CO₂-Preises oder die Anpassung der Energiebesteuerung wirken, aber eher mittelfristig und hier vor allem auf die Verkehrsverlagerung und -vermeidung, insbesondere im Personenverkehr.

Des Weiteren wurde in den Analysen deutlich, dass die preislichen Lenkungswirkungen (durch die Anpassung staatlich bestimmter Energiepreisbestandteile) insbesondere bei den Pkw einen schwachen Effekt auf die Elektrifizierung haben. Grund dafür ist, dass die in der Nutzungsphase anfallenden Energiekosten nur schwach in der Kaufentscheidung bei Pkw berücksichtigt werden. Insbesondere die Szenarien erhöhter CO₂-Preis (S2) und Anpassung der Energiebesteuerung (S3) zeigen zwar die Lenkungswirkung staatlich bestimmter Energiepreisbestandteile im Verkehrssektor, gleichzeitig werden aber auch Limitierungen in der Lenkungswirkung deutlich. Insbesondere die Pkw-Neuzulassungen reagieren allenfalls träge auf reine Anpassungen der Energiekosten. Das Unterschätzen und die Unsicherheit der zukünftigen Energiekosten bei der Pkw-Anschaffung machen deutlich, dass die notwendige Bestandsumwälzung auf emissionsfreie Fahrzeuge nicht allein durch Anpassungen der Energiepreisbestandteile erreicht werden kann. Ferner scheint es politisch im Zuge dessen schwierig hohe CO₂-Preise durchzusetzen, wenn es an Alternativen mangelt. Umgekehrt können flankierende Instrumente die Akzeptanz für steigende Preise für fossile Energien steigern, wenn dadurch attraktive Ausweichmöglichkeiten entstehen.

Welche politikrelevanten Erkenntnisse erlauben ökonomische Modellierungen von preislichen Lenkungswirkungen im Verkehr?

Die Variation von staatlich bestimmten Energiepreisbestandteilen kann einen relevanten Beitrag zur Emissionsreduktion im Verkehrssektor leisten. Die ökonomische Modellierung trägt dazu bei, ein Verständnis für die Wirkmechanismen zu erlangen. Vor allem kann gezeigt werden, dass eine Kombination an Instrumenten mit verschiedenen Wirkungsmechanismen und unterschiedlichem Fokus helfen die Emissionen schneller und deutlicher zu senken. Der Einsatz von Modellen ist eine hilfreiche Stütze, um die Notwendigkeit politischen Handelns deutlich zu machen und vor allem, um die Vor- und Nachteile von Maßnahmen und Instrumenten quantitativ einzuordnen.

Summary

The transport sector was unable to meet the emission targets laid down in legislation in 2021, 2022 or 2023. With the second amendment of the German Federal Climate Change Act having come into force, the annual emissions targets now have to be met across all sectors only. However, the target for the transport sector to achieve greenhouse gas neutrality by 2045 remains in place. In addition, emissions from the transport sector are subject to the European Climate Law and must therefore fall by 50 % in Germany compared to 2005. This reduction target foresees a comparable contribution to emission reduction as the transport sector targets defined in the Climate Change Act. This shows that a fundamental transformation of the transport sector is absolutely necessary. The existing climate policy instruments are not enough. There is thus an urgent need for political action so that suitable climate policy instruments are introduced.

In addition to the instruments that have already been adopted, such as the tightening of EU fleet targets for passenger cars and light commercial vehicles or the introduction of a CO₂ surcharge in the German lorry toll, further instruments are needed to reduce annual emissions and close the gap in the transport sector's emissions budget. In addition to establishing new instruments, existing instruments can also be adapted. Possible starting points could be, for example, state-determined energy price components such as the energy or electricity tax or the carbon price. This analysis thus focuses on the steering effect of state-imposed components of the energy price.

Methodological approach

The TEMPS model developed by Oeko-Institut is used to analyse the steering effect of state-imposed components of the energy price. The model makes it possible to quantify the final energy demand, the composition of the fleet, the transport demand and the greenhouse gas emissions of the transport sector for different scenarios, taking into account the political and economic framework conditions.

The core component of the model is the market modelling of road vehicles (cars, light commercial vehicles and lorries) using a detailed model of new registrations and existing vehicles. The model simulates purchasing decisions for representative usage profiles, taking into account technical, economic and regulatory conditions. For all other transport modes (rail, maritime, air, buses, motorcycles, bicycles), assumptions are made regarding propulsion systems and their efficiency development.

Regulatory framework conditions and market developments at national and European level are taken into account in all scenarios, e.g. through the expansion of the charging infrastructure, taxes, tolls or efficiency standards that must be adhered to. In addition, the economic efficiency of vehicles is also influenced by global trends, such as the development of crude oil prices or battery prices, which are also considered.

Changes in final energy prices influence purchasing decisions, among other things. Four scenarios are used to illustrate how certain energy price changes affect transport performance, fleet composition and ultimately the greenhouse gas emissions in national transport. The reference scenario is the "With additional measures scenario" of the 2023 Projection Report (Harthan et al. 2023). This scenario includes all climate protection measures already adopted (as of 31 August 2022) as well as the so-called Germany rail ticket and the extension of the German lorry toll to include a CO₂-based surcharge amounting to 200 Euro/tCO₂.

Design of the scenarios

The four analysed scenarios comprise different configurations of the energy price components. In scenarios S1 and S2, the effects of halving or doubling the carbon price compared to the reference in the transport sector are analysed. In the context of the “what-if” scenarios, it is assumed that the introduction of the EU ETS2 in 2027 will result in harmonisation with the ETS1² and the steering effect of such a change is discussed. The price paths in S1 and S2 therefore correspond to halving or doubling the EU ETS1 reference price from 2027 onwards. Scenario S3 analyses a gradual increase in the energy tax rate on diesel, LPG and methane from 2024 to 2026 up to the energy content of petrol. In addition, an inflation adjustment is introduced from 2026 onwards. The annual inflation will lead to a gradual decrease in the real tax burden of energy taxation. In order to prevent this decrease and to keep the real tax rates constant, the nominal tax rates are increased in line with the annual inflation rate from 2024 onwards. In scenario S4, the electricity tax is reduced in line with the proposal for the Energy Tax Directive. Accordingly, the electricity tax is reduced to a minimum of 0.054 ct/kWh.

Results

In the reference case, there are already a large number of policy instruments in the transport sector that make a significant contribution to the transformation and CO₂ reduction in the transport sector over time. A detailed description of the instruments and packages of measures that are already effective in the reference case can be found in the German government's 2023 Projection Report.

Table 1 provides a summary of the results of the projected GHG emissions in the different scenarios.

Table 1: GHG emissions in years, comparison of scenarios (in Mt CO₂eq)

Scenario	Short description	2025	2030	2035	2040	2045
Reference		144.3	107.6	71.6	34.9	14.6
S1	low carbon price	144.3	110.4	74.7	35.5	14.6
S2	high carbon price	144.3	100.7	64.3	31.8	13.7
S3	adapted energy tax	141.7	101.2	63.7	32.0	14.0
S4	min. electricity tax	144.1	107.3	70.8	34.0	14.3
V1	surcharge, 1 variant	144.2	103.5	64.4	29.7	12.4
V2	surcharge, 2 variant	144.2	101.3	60.9	27.6	11.5

Source: Authors' own, Oeko-Institut

A higher carbon price has a positive effect on modal shift but is not sufficient to achieve the sectoral targets.

The change in the carbon price (S1 and S2) affects the operating costs of cars and lorries, but in different ways. It affects both the modal shift and purchasing decisions. In the case of cars, strengthened fleet targets already provide financial incentives for the purchase of zero-emission powertrains. This partly masks the additional cost effect of the carbon price. The change in fuel

² Emissions Trading System: EU-wide cap-and-trade system to reduce CO₂ emissions, particularly for the energy supply and industry sectors.

prices caused by the carbon price also has an impact on the modal split of passenger transport demand. As a result, more transport is shifted to eco-mobility. In freight transport, the carbon price affects a large part of the fleet, which consists almost exclusively of diesel vehicles, as does the CO₂-based surcharge in the lorry toll. However, the market expansion of BEVs is largely dependent on the expansion of the charging infrastructure.

The highest emission reductions in 2030 (S2), which amount to -6.9 MtCO₂-eq (cumulative to around 30.4 MtCO₂eq by 2030) compared to the reference scenario, are achieved by the high carbon price. The energy tax adjustment leads to reductions (S3) of -6.4 MtCO₂-eq (cumulative to around 32.5 MtCO₂eq by 2030).

The impact of the carbon price diminishes as the fleet becomes more electrified. This applies to both passenger cars and lorries. It is also clear that the additional steering effect of high carbon prices alone is not sufficient to achieve the sectoral targets in transport. Additional instruments are needed.

The increase in the energy tax and the introduction of inflation compensation for fossil fuels have a positive effect on modal shift.

The steering effect of the energy tax increase and the introduction of inflation compensation is similar to the effect of rising carbon prices. While rising carbon prices continue to have an effect after 2030 and lead to modal shifts, only inflation compensation has an additional effect once the energy tax has been fully harmonised. As a result, the carbon price has a stronger long-term effect than the energy tax adjustment, with the lowest emissions reached in 2045.

In addition, both the high carbon price and the adjustment of the energy tax will lead to a strong shift of passenger transport to other modes, especially rail.

The adjustment of the electricity tax has only a minor steering effect.

By adjusting the electricity tax and introducing an inflation adjustment, the electricity price will decrease by seven percent in 2030 compared to the reference scenario. However, the structure of new registrations of trucks and cars will only change marginally as a result. The electricity tax adjustment has only a minor effect on passenger and freight transport performance.

A mix of instruments is needed.

A combination of instruments and measures with different impact mechanisms and a different focus helps to reduce emissions faster and more substantially and thus achieve the climate policy targets in the transport sector. Changes to energy prices by adjusting state-imposed components of the energy price in combination with other instrument have a good effect. In passenger transport, the fleet target values for passenger cars play a particularly decisive role, ensuring predictability and a supply of emission-free vehicles by signaling to the industry and thus providing alternatives that are not affected by rising carbon prices. In freight transport, the CO₂-based surcharge (200 Euros/tCO₂) in the lorry toll has a strong price effect on new lorry registrations. The analysis shows the effect of a premium payment for high-emission passenger cars on new registrations with different structures. The penalty has a strong effect on the structure of new car registrations and leads to a strong acceleration in the electrification of the fleet. With the help of the premium, around 4.1 million tCO₂eq can be saved by 2030 (with a less ambitious design, V1) and 6.3 million tCO₂eq with a more ambitious design (V2) in 2030. This reduction is realised through the differences in the drive distribution of newly registered cars, while the adjustment of energy costs in the vehicle's use phase, e.g. by adjusting the energy tax or the carbon price, is increasingly aimed at shifting and reducing traffic.

What is the impact of adjustments to state-imposed components of the energy price in the transport sector and how strong is their steering effect?

The results show that in none of the analysed scenarios is the instrument design sufficient to achieve the national sectoral climate targets by 2030 or climate neutrality by 2045. The sensitivity analysis shows that in addition to adjusting energy price components (e.g. a high carbon price), further measures are needed to accelerate electrification. The introduction of a premium can accelerate this. This measure has a greater influence on the choice of drive than a direct increase in the price of fossil fuels. Increasing the carbon price or adjusting the energy tax has a more medium-term effect, particularly on modal shift and reduction of traffic, especially in passenger transport.

Furthermore, it became clear in the analyses that the price steering effects (by adjusting state-imposed controlled components of the energy price) have a weak effect on electrification, particularly in the case of passenger cars. The reason for this is that the energy costs incurred in the utilisation phase are only weakly considered in the purchase decision for passenger cars. In particular, the scenarios with an increased the carbon price (S2) and adjustment of the energy tax (S3) show the steering effect of state-imposed components of the energy price in the transport sector but, at the same time, limitations in the steering effect also become clear. New car registrations react sluggishly at best to mere adjustments in energy costs. The underestimation and uncertainty of future energy costs for car purchases make it clear that the necessary shift to zero-emission vehicles cannot be achieved by adjusting energy price components alone. Furthermore, it seems politically difficult to enforce a high carbon price if there is a lack of alternatives. Conversely, flanking instruments can increase the acceptance of rising prices for fossil fuels if they create attractive alternatives.

What policy-relevant insights can be gained from economic modelling of price steering effects in the transport sector?

Varying state-imposed components of the energy price can make a significant contribution to reducing emissions in the transport sector. Economic modelling helps to understand the impact mechanisms. In particular, it can be shown that a combination of instruments with different impact mechanisms and different emphases helps to reduce emissions faster and more substantially. The use of modelling is a useful tool to clarify the need for policy action and, in particular, to quantify the advantages and disadvantages of measures.

1 Hintergrund

Disclaimer

Der vorliegende Bericht und die Inhalte wurden in Zusammenarbeit mit dem Umweltbundesamt intensiv abgestimmt. Sie beziehen sich auf den Bearbeitungszeitraum bis Herbst 2023. Aus diesem Grund setzen die diskutierten Szenarien auf den Modellierungen des Projektionsberichts 2023 auf. Das Mit-weiteren-Maßnahmen-Szenario beinhaltet daher alle bis zum Sommer 2022 verabschiedeten Gesetze als auch Gesetze mit hoher Wahrscheinlichkeit auf Umsetzung. Letztere können sich in Ihrer Umsetzung von der im Modell gewählten Parametrisierung unterscheiden. Die Parametrisierung beruht jedoch auf der zum Zeitpunkt der Erstellung (Sommer 2023) angenommenen und abgestimmten Umsetzung (Öko-Institut et al. 2023).

Ferner sieht der Bericht keine umfassende Beschreibung des Modells TEMPS vor. Die beschriebenen Funktionsweisen und Umsetzungen sind teilweise vereinfacht und nur als selektive Aspekte dargestellt, um ein besseres Verständnis für die in den Szenarien umgesetzten Politikinstrumente und ihre Wirkungsweise im Modell für die Leserinnen und Leser zu schaffen.

Deutschland hat sich mit der Ratifizierung des Pariser Klimaabkommens und dem Bekenntnis zum Zwei-Grad-Ziel völkerrechtlich dazu verpflichtet, die Erderwärmung einzugrenzen und entsprechende Klimaschutzmaßnahmen auf den Weg zu bringen. Ferner wurde 2019 das Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) erlassen, welches den Emissionszielpfad differenziert für jeden Sektor in Deutschland bis zum Jahr 2030 vorgibt. Des Weiteren wurde die angestrebte Klimaneutralität 2045 im Gesetz verankert. Der Verkehrssektor konnte die im Gesetz definierten Emissionsziele weder im Jahr 2021, 2022 noch im Jahr 2023 einhalten (Harthan et al. 2024). Mit Inkrafttreten der zweiten Novelle des KSG müssen fortan die im Zielpfad definierten Jahresemissionsmengen nur noch sektorübergreifend erfüllt werden, die sektorspezifischen Emissionsziele bleiben jedoch weiterhin gesetzlich verankert und sind für das Monitoring der Fortschritte eines jeden Sektors hin zur Treibhausgasneutralität weiterhin relevant. Sollte die sektorübergreifenden Jahresemissionsmengen überschritten werden, sind insbesondere die Sektoren zum Handeln aufgefordert, die oberhalb ihres Zielpfades liegen (Bundesregierung 2024). Ferner unterliegen die Emissionen des Verkehrssektors der Europäischen Klimaschutzverordnung und müssen demnach in Deutschland um 50 % gegenüber 2005 sinken (Umweltbundesamt 2024).

Die vorangegangenen Zielverfehlungen zeigen einmal mehr die Notwendigkeit einer grundlegenden Transformation des Verkehrssektors. Insbesondere vor dem Hintergrund, dass auch der Verkehrssektor bis 2045 treibhausgasneutral werden muss und notwendige Investitionen wie beispielsweise in Infrastruktur zeitnah und langfristig getätigt werden müssen, um die Transformation an vielen Stellen erst zu ermöglichen und die Kosten gering zu halten und Fehlinvestitionen zu vermeiden. Bereits bestehende Klimaschutzinstrumente reichen den Projektionen des Projektionsbericht 2023 nach auch in den folgenden Jahren nicht aus, um den Sektor maßgeblich wieder auf Kurs zu bringen (Harthan et al. 2023). Es besteht akuter politischer Handlungsbedarf geeignete (zusätzliche) Klimaschutzinstrumente auf den Weg zu bringen.

Neben den bereits beschlossenen Instrumenten wie bspw. der Verschärfung der EU-Flottenzielwerte für Personenkraftwagen (Pkw) und leichte Nutzfahrzeuge (LNF) oder der Einführung einer CO₂-Komponente bei der Lastkraftwagen-Maut (Lkw-Maut) werden weitere

Instrumente nötig sein, um die Jahresemissionsmengen zu senken und die Lücke zum Emissionsbudget des Verkehrssektors zu schließen.

Neben der Etablierung neuer Instrumente kann auch auf die Anpassung bereits bestehender Instrumente zurückgegriffen werden. Mögliche Anknüpfungspunkte können hier beispielsweise staatlich bestimmte Energiepreisbestandteile wie die Energie- oder Stromsteuer oder aber der CO₂-Preis sein.

Vor diesem Hintergrund beantwortet diese Studie die folgenden Fragen:

1. Welchen Einfluss haben CO₂- und Energiepreise im Verkehrssektor und wie groß ist ihre Lenkungswirkung?
2. Welche politikrelevanten Erkenntnisse erlauben ökonomische Modellierungen von preislichen Lenkungswirkungen im Verkehr?

Mithilfe des am Öko-Institut entwickelten Modells TEMPS (**T**ransport **E**missions and **P**olicy **S**cenarios) werden vier verschiedene alternative Ausgestaltungsvarianten staatlich bestimmter Energiepreisbestandteile hinsichtlich ihrer Lenkungswirkung untersucht. Ziel der Analyse ist es, die verschiedenen Ausgestaltungsmöglichkeiten hinsichtlich der Wirkung auf Verkehrsnachfrage und Verlagerung, Neuzulassungsstruktur und Treibhausgasemissionen zu vergleichen und so die klimapolitische Lenkungswirkung von CO₂- und Energiepreisen einzuordnen. Ferner wird auch auf etwaige Wechselwirkungen mit bereits bestehenden Instrumenten eingegangen. Die Basis für die Szenarien bildet das Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenario (MWMS) des Projektionsberichts 2023 (Harthan et al. 2023).

In Kapitel 2 wird eine kurze Einführung in die Modellierung mit dem Modell TEMPS gegeben, um die verschiedenen im Modell erfassten Anpassungsreaktionen bei Energiepreisänderungen im Verkehr zu verstehen und die Grundlage für die Einordnung der mit TEMPS berechneten Ergebnisse in Kapitel 3 zu schaffen. In Kapitel 3 werden verschiedene Szenarien berechnet, in denen staatliche bestimmte Energiepreisbestandteile ebenso variiert werden wie die Effekte eines anschaffungsbezogenen Preisaufschlags. Anschließend werden die Ergebnisse diskutiert und in Kapitel 4 zusammengefasst und eingeordnet.

2 Das Modell TEMPS und die Lenkungswirkung von Energiepreisen

Das am Öko-Institut entwickelte Modell TEMPS ermöglicht es, den Endenergiebedarf und die Treibhausgasemissionen des Verkehrs für unterschiedliche Szenarien und unter Berücksichtigung von politischen und ökonomischen Rahmenbedingungen zu quantifizieren. Darüber hinaus lassen sich Verlagerungen der Verkehrsnachfrage sowie der Neuzulassungsstruktur und dem Fahrzeugbestand von Straßenfahrzeugen bestimmen.

Kernbestandteil des Modells ist die Marktmodellierung für Straßenfahrzeuge (Pkw, LNF und Lkw) mittels eines detaillierten Neuzulassungs- und Bestandsmodells. Im Modell wird die Kaufentscheidung für repräsentative Nutzungsprofile unter Berücksichtigung von technischen, ökonomischen sowie regulatorischen Bedingungen simuliert. Für alle übrigen Verkehrsträger (Schienenverkehr, Schifffahrt, Luftfahrt, Busse, Motorräder, Fahrräder) werden Annahmen über Antriebe und ihre Effizienzentwicklung hinterlegt.

In allen Szenarien werden regulatorische Rahmenbedingungen und Marktentwicklungen auf nationaler und europäischer Ebene berücksichtigt, beispielsweise durch Steuern, Mautgebühren oder Grenzwerte, die eingehalten werden müssen. Darüber hinaus ist die Wirtschaftlichkeit von Fahrzeugen auch von globalen Trends beeinflusst, wie zum Beispiel der Entwicklung der Kraftstoffpreise oder der Batteriepreise. Bei Nutzfahrzeugen spielt außerdem der Logistikmarkt und der Ausbau von Ladeinfrastruktur für batterieelektrische Fahrzeuge eine entscheidende Rolle.

In den folgenden Kapiteln werden die wesentlichen Bestandteile des Modells beschrieben. Dafür werden zunächst Nutzungsprofile und Fahrzeugkonfigurationen dargestellt und die Kaufentscheidung, die Neuzulassungsmodellierung sowie das Bestandsmodell für Straßenfahrzeuge beschrieben. Anschließend wird der Umgang mit der Verkehrsnachfrage samt Verlagerungswirkungen und die Energie- und Treibhausgasbilanz dargelegt.

2.1 Nutzungsprofile und Fahrzeugkonfigurationen

Die Methodik der Neuzulassungsmodellierung beruht auf einem Bottom-up Ansatz für die Kaufentscheidung von Fahrzeugen durch Nutzungsprofile. Die Gesamtheit der Nutzungsprofile bildet das Fahrverhalten der Bevölkerung im motorisierten Individualverkehr (MIV) bzw. das Fahrverhalten der Logistikunternehmen im Güterverkehr repräsentativ ab.

Ein Nutzungsprofil wird über die folgenden Merkmale charakterisiert:

- ▶ Größenklasse des Fahrzeugs,
- ▶ Art des Halters (privat, gewerblich, dienstwagennutzend, Carsharing),
- ▶ Regionstyp des Halters (innerstädtisch, städtisch, ländlich),
- ▶ Jahresfahrleistung,
- ▶ Haltedauer.

Die Nutzungsprofile im MIV basieren auf dem „Mobilitätspanel“ (MOP) (Ecke et al. 2021) und der „Mobilität in Deutschland 2017“ (Nobis und Kuhnimhof 2018). Die Neuzulassungen werden anhand der Daten der EU-Monitoring Datenbank³ für neuzugelassene Fahrzeuge in Deutschland

³ Die Datenbank umfasst jahresfeine detaillierte Informationen zu den Neuzulassungen in den EU27-Staaten, siehe (EEA 2023.)

kalibriert, d.h. für das Jahr der Kalibrierung wird die Neuzulassungsstruktur im Modell nachgebildet. Die Verteilung nach Größenklassen wird dann für die Projektionen konstant gehalten, sodass Veränderungen von Rahmenbedingungen wie beispielsweise veränderte Energiekosten keine Auswirkungen auf die Wahl der Größenklassen haben. Die Nutzungsprofile der Lkw und LNF beruhen auf der Erhebung „Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010“ (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) 2010) und der Fahrleistungserhebung 2014 (Bäumer et al. 2017; Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) 2015).

Jedem Nutzungsprofil stehen Fahrzeuge mit verschiedenen Antrieben und Effizienzklassen der jeweiligen Größenklasse zur Verfügung, soweit diese auf dem Markt erhältlich sind (bspw. stehen rund 140 Effizienzklassen für Benzin-Pkw zur Wahl). In Tabelle 2 sind die möglichen Antriebe für Pkw und Lkw dargestellt, die sich auf verschiedene Größenklassen verteilen (Tabelle 3).

Tabelle 2: Mögliche Antriebsoptionen in TEMPS

Pkw	Lkw
Benzin	
Diesel	Diesel
Plug-In-Hybrid (PHEV)	
Batterieelektrischer Antrieb (BEV)	Batterieelektrischer Antrieb (BEV)
Flüssiggasantrieb (LPG)	
Erdgasantrieb (CNG)	Erdgasantrieb (LNG)
Brennstoffzellenantrieb (FCEV)	Brennstoffzellenantrieb (FCEV)
	Batterieelektrische Oberleitungs-Lkw (O-BEV)

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Tabelle 3: Größenklassen für Pkw und Lkw

Pkw	Lkw
Klein	Lkw von 3,5 bis 7,49 t
Mittel	Lkw von 7,5 bis 11,99 t
Groß	Lkw ab 12 t
Leichte Nutzfahrzeuge (LNF)	Last- und Sattelzüge

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Jedes Fahrzeugmodell verfügt über eine Reihe an teils notwendigen teils optionalen Kostenbestandteilen (siehe Tabelle 4). Die Effizienz des Fahrzeugmodells erschließt sich über die Kostenkurve eines jeweiligen Antriebs. Für jede Konfiguration an Größenklasse und Antrieb werden alle verfügbaren Effizienzklassen berücksichtigt.

Tabelle 4: Kostenbestandteile der TCO

Investitionskosten	Laufende Kosten
Anschaffungspreis, Absetzung für Abnutzung (AfA) für gewerbliche Nutzungsprofile	Kraftstoffkosten (inkl. Energiesteuern)
Kaufförderung	Kfz-Steuer
Restwert	Maut
	Wartung, Reparatur, Versicherungen etc.

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

2.2 Neuzulassungsmodell

Für die Bestimmung der Kaufentscheidung werden in einem ersten Schritt die Kosten aller verfügbaren Fahrzeugmodelle je Nutzungsprofil mittels Total Cost of Ownership-Rechnung (TCO-Rechnung) über die jeweilige angenommene Haltedauer berechnet und anhand verschiedener verfügbarer Effizienzklassen die kostengünstigste je Antriebstyp ermittelt.⁴ Es zeigt sich, dass die langfristigen Kosten der Fahrzeughaltung und -nutzung bei privaten Fahrzeugkäuferinnen und -käufern in der Kaufentscheidung meist nicht angemessen berücksichtigt wird, d. h. es findet eine gedankliche Abzinsung statt (Mock 2010). In TEMPS wird angenommen, dass die privaten Pkw-Käufe nur die ersten Jahre bei der Kaufentscheidung zu Grunde legen, um somit ein Unterschätzen der zukünftigen Energiekosten durch die Autokaufenden abzubilden (Fan und Rubin 2010; Allcot und Wozny 2012). Zukünftige Zahlungen innerhalb der für die Kalkulation angenommenen Haltedauer werden mit einer Diskontrate von zehn Prozent diskontiert.

Bei Lkw spielt die Haltedauer für die Wirtschaftlichkeit eines Fahrzeugs eine entscheidende Rolle. Generell liegen die Haltedauern bei Lkw aufgrund ihrer hohen Fahrleistung deutlich niedriger als bei Pkw. In einer standardisierten Online-Befragung von Transportunternehmen im Frühjahr 2021 (Göckeler et al. 2022), wurden typische Haltedauern zwischen drei und neun Jahren ermittelt. Bei allen gewerblichen Haltern wird außerdem die Abschreibung berücksichtigt, welche mindernd auf die Unternehmenssteuern wirkt. Es wird dabei ein Unternehmenssteuersatz von 30 % zu Grunde gelegt, sowie eine Abschreibungsdauer von neun Jahren.

Für die Restwerte werden bei Pkw analog zum Vorgehen in Hacker et al. (2015) Regressionskurven zu Grunde gelegt, welche den Restwert eines Fahrzeugs unter Berücksichtigung von Anschaffungspreis, Fahrleistung und Fahrzeugalter sowie Haltedauer bestimmen. Der Einfluss von Energiepreisen und Energiepreisbestandteilen (wie bspw. CO₂-Preis) wird im Rahmen der Restwertberechnung nicht berücksichtigt.

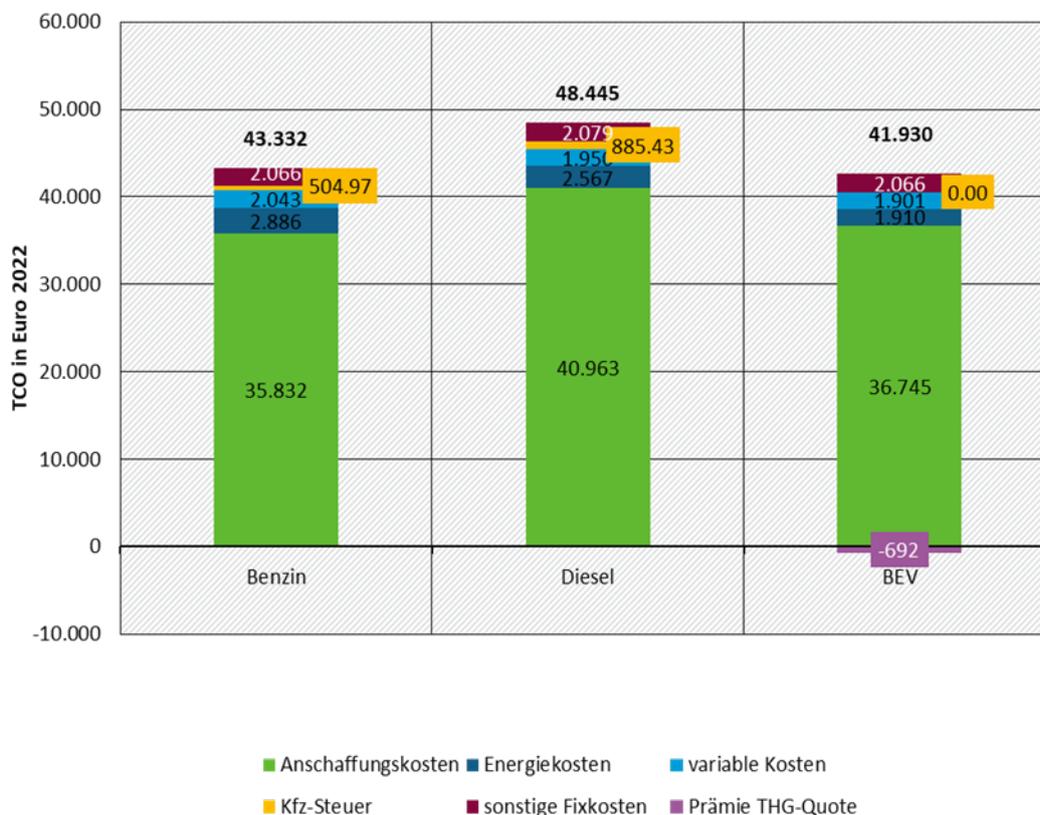
Text Box 1: Beispiel TCO bei Pkw für eine Neuanschaffung im Jahr 2030 im Modell TEMPS

Abbildung 1 zeigt eine beispielhafte TCO für ein Pkw-Nutzungsprofil mit einer Jahresfahrleistung von 9.000 km. Alle Kostenbestandteile werden über eine Haltedauer von drei Jahren aufsummiert und diskontiert. Es wird eine Haltedauer von drei Jahren angenommen, um das systematische Unterschätzen der Folgekosten durch die Autokäufer*innen abzubilden. Es werden exemplarisch drei Antriebe verglichen Benzin, Diesel und BEV. Die TCO setzt sich aus den Kostenbestandteilen aus Tabelle 3 zusammen. Die Anschaffungskosten beinhalten den Kaufpreis abzüglich dem Wiederverkaufswert nach einer Haltedauer von drei Jahren, welcher u. a. von der

⁴ Je geringer die Effizienz desto günstiger ist der Anschaffungspreis. Je nach Fahrleistungsprofil ergibt sich so eine individuelle günstigste Option bei der Wahl der Fahrzeugeffizienz.

Jahresfahrleistung abhängt, und entsprechen dadurch dem Wertverlust während der Haltedauer. Die Energiekosten betragen bei Diesel und BEV fünf Prozent der Gesamtkosten, beim Benzin sind es sieben Prozent. Bei höheren Jahresfahrleistungen steigt der Anteil der Energiekosten entsprechend. Die Energiekosten machen also bei Pkw nur einen geringen Anteil der TCO-Rechnung aus. Änderungen bei Energiepreisbestandteilen, bspw. über eine Erhöhung des CO₂-Preises oder eine Veränderung der Energiesteuer haben dadurch bei Pkw einen geringfügigen Effekt auf die Kaufentscheidung bei Neuwagen.

Abbildung 1: Beispiel TCO für drei Antriebe eines Pkw-Profiles bei Neuanschaffung



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

2.2.1 Logit-Modell für Pkw

Nachdem in der TCO-Rechnung für jedes Nutzungsprofil und jeden Antrieb die kostengünstigste Motorisierung bzw. Effizienz ermittelt wird, werden bei den Pkw anschließend Auswahlwahrscheinlichkeiten der verschiedenen Antriebsarten über ein Logit-Modell bestimmt. Das Logit-Modell dient dazu, antriebspezifische Attraktivitätsmerkmale, die über die rein ökonomische Betrachtung hinausgehen, zu berücksichtigen.

Die Realität zeigt, dass Menschen sich nicht grundsätzlich für das günstigste Fahrzeug entscheiden, sondern andere Kriterien wie Komfort (z.B. Tank- oder Lademöglichkeiten), Gewohnheit, Popularität oder Status bei der Kaufentscheidung von großer Bedeutung sind. Diese antriebspezifischen Charakteristika werden über das Logit-Modell abgebildet.

Die Wahrscheinlichkeit für den Kauf eines Pkw mit dem Antrieb i kann mit dem Logit-Modell mittels der Gleichung

$$P(X_i) = \frac{\exp(\text{val}(X_i))}{\sum \exp(\text{val}(X_j))}$$

beschrieben werden. Dabei bezeichnet X_i einen Pkw mit Antrieb i . $val(X_i)$ ist eine Wertfunktion, die der TCO des Fahrzeugs X_i sowie die Logit Parameter beinhaltet und sich je nach Käufer unterscheidet, denn sie hängt u. a. von der Haltergruppe (gewerblich/privat) und dem geplanten Fahrleistungsprofil des Käufers ab.

Die Logit-Parameter des Modells werden an den Neuzulassungszahlen des letzten historischen Jahres kalibriert. Aufgrund der verschärften CO₂-Flottenzielwerte, die bis zum Jahr 2035 auf null sinken, wird zusätzlich davon ausgegangen, dass die Attraktivität von alternativen Antrieben sich bis 2035 sukzessive dem Niveau von Benzinern annähert.

2.2.2 Neuzulassungsstruktur für Nutzfahrzeuge

Anders als bei den Pkw erfolgt die Kaufentscheidung nach Antrieben bei den Nutzfahrzeugen allein auf Basis ökonomischer Kriterien. Dies beruht auf der Annahme, dass bei (Logistik)-Unternehmen die Wirtschaftlichkeit der Fahrzeuge im Fokus steht.

Die Antriebswahl erfolgt über einen Vergleich der Kosten der in der TCO ermittelten Effizienzen. Wenn die Gesamtnutzungskosten für verschiedene Antriebsarten ähnlich sind, erfolgt die Auswahl des Antriebs mithilfe einer stochastischen Zufallsfunktion (Normalverteilung mit Sigma = 0,015). Dadurch soll sichergestellt werden, dass ein möglicherweise nur geringfügiger wirtschaftlicher Vorteil eines Antriebs keine übermäßige Auswirkung auf die Verteilung der Neuzulassungen hat.

2.2.3 Energieinfrastruktur

Bei batterieelektrischen Antrieben spielt das Fahrverhalten eine entscheidende Rolle bei der Antriebswahl. So werden sich Nutzerinnen und Nutzer, die oft weite Strecken fahren nicht für einen batterieelektrischen Antrieb entscheiden, so lange nicht eine hinreichende Ladeinfrastruktur zur Verfügung steht.

Bei Pkw werden die Einsatzrestriktionen von batterieelektrischen Antrieben in Abhängigkeit von der Anzahl der die Batteriereichweite überschreitenden Fahrten des jeweiligen Nutzungsprofils parametrisiert. Die absolute Anzahl solcher Fahrten ist aus den Wegedatensätzen der MiD (Nobis und Kuhnimhof 2018) und KiD (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) 2010) für 30 verschiedene Gruppen abgeleitet, wobei jede Gruppe nach Haltergruppe, Größenklasse und Jahresfahrleistungsklasse differenziert wird. Je Nutzungsprofil wird die Anzahl an Fahrten abseits der Batteriereichweite über eine Poissonverteilung über den berechneten Mittelwert bestimmt. Analog zu dem Projekt OPTUM (Zimmer et al. 2011) wird angenommen, dass beim Kauf eines batterieelektrischen Pkw maximal acht Fahrten pro Jahr länger sein dürfen als die Reichweite des Fahrzeugs. Für alle elektrischen Antriebe wird vereinfacht eine Batteriereichweite von 300 km hinterlegt. Durch den Ausbau der öffentlichen Ladeinfrastruktur erhöht sich die Anzahl von erlaubten Fahrten bis im Jahr 2035 keine Restriktionen mehr bestehen.

Der Aufbau eines öffentlichen Ladesystems für schwere Nutzfahrzeuge befindet sich noch in einer frühen Entwicklungsphase, wodurch die Einsatzmöglichkeiten von batterieelektrischen Fahrzeugen limitiert sind. Die schrittweise Zunahme flächendeckender und leistungsstarker Lademöglichkeiten wird dazu führen, dass die Restriktionen bezüglich der Reichweite nach und nach abgebaut und batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) universeller eingesetzt werden können.

Für BEV werden drei Ausbaustufen der Infrastruktur definiert. In der ersten Ausbaustufe können Lkw nur einmal täglich im Depot geladen werden. In der zweiten Ausbaustufe kann nach jeder Tour, beispielsweise an öffentlichen Ladepunkten, an Logistikzentrum oder bei Kundinnen

und Kunden nachgeladen werden. In der dritten Stufe kann jederzeit während der Fahrt an öffentlichen Megawatt-Ladepunkten entlang der Autobahn zwischengeladen werden. Eine detaillierte Beschreibung der Methodik zur Ladeinfrastruktur ist der Studie Göckeler et al. (2023) zu entnehmen.

Für Brennstoffzellenantriebe (FCEV) werden modellseitig keine direkten Restriktionen des Fahrzeugeinsatzes berücksichtigt. Die Verfügbarkeit des Wasserstofftankstellennetzes wird modellseitig monetär abgebildet, indem ein Aufschlag im Rahmen der TCO - je nach Tankstellenverfügbarkeit - berücksichtigt wird. Es wird davon ausgegangen, dass technische Entwicklungen dazu führen, dass im Jahr 2030 bis zu 1.000 km Reichweite erreicht werden.

2.3 Bestandsmodellierung

Grundlage für die Bestandsmodellierung der Pkw ist die Motorisierungsrate, welche das Verhältnis von Pkw zu Einwohnern angibt. Bis 2030 wird die historische Entwicklung der Motorisierungsrate fortgeschrieben, danach wird angenommen, dass die Motorisierungsrate konstant bleibt. Mithilfe von Bevölkerungsprognosen lässt sich der nationale Pkw-Bestand jahresscharf ableiten und fließt dann als Inputgröße in das Modell.

Die Lebensdauer der Pkw im Bestand wird über Überlebenskurven abgebildet, welche aus dem Modell TREMOD vom ifeu übernommen werden (Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (ifeu) 2023). Diese Überlebenskurven sind abhängig von Größenklasse und Antrieb. In der Bestandsmodellierung wird für jedes Jahr zunächst berechnet welche Fahrzeuge entsprechend der Überlebenskurven aus dem Bestand ausscheiden. Dann wird der Anteil an Fahrzeugen bestimmt, die von kommerziellen Halten nach einer Haltedauer von drei Jahren in den privaten Bestand übergehen. Anschließend wird die Differenz aus der Flotte und dem Zielwert aus dem Input berechnet. Diese Differenz wird dann zu aus der Empirie abgeleiteten Anteilen von kommerziellen und privaten Haltern durch Neuzulassungen aufgefüllt.

Die Bestandsmodellierung von Lkw wird analog zur Bestandsmodellierung der Pkw durchgeführt. Die Größe des Lkw-Bestandes ist eine Inputgröße für die Modellierung und hängt von der Güterverkehrsnachfrage ab.

2.4 Verkehrsnachfrage

Die Referenzverkehrsnachfrage ist modellexogen. Die Verkehrsnachfrage wird für verschiedene Verkehrsträger separat eingelesen. Sie setzt sich aus Daten historischer Jahre sowie einer Steigerungsrate für zukünftige Entwicklungen zusammen. Sowohl bei der Personen- als auch der Güterverkehrsnachfrage (gemessen in Personenkilometern bzw. Tonnenkilometern) beruhen die historischen Daten auf den Ergebnissen aus dem Modell TREMOD. Für zukünftige Entwicklungen wird auf die Steigerungsraten aus dem Referenzszenario 2017 (REF-2017) der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie (MKS) (Schade et al. 2018) zurückgegriffen.

Während bei der Personenverkehrsnachfrage zusätzlich die Bevölkerungsentwicklung Berücksichtigung findet, orientiert sich die Trendfortschreibung des Gütertransportaufkommens stark an der Entwicklung des Bruttoinlandsprodukts (BIP) und den damit zusammenhängenden Handelsströmen und Transporten. Ein steigendes BIP führt damit auch zu einem Anstieg der Güterverkehrsleistung.

Ausnahmen bilden die internationalen Verkehre (Schiff- und Luftverkehr) sowie der nationale Luftverkehr. Beim nationalen und internationalen Luftverkehr werden historische Jahre anhand der Daten des Statistischen Bundesamtes (Destatis) nachgeführt. Für die Prognose zukünftiger Entwicklungen wird die Verkehrsprognose 2030 fortgeschrieben (BVU Beratergruppe et al.

2014). Abweichungen von der Referenzverkehrsnachfrage durch Politikinstrumente und –maßnahmen werden modellintern bestimmt.

2.4.1 Verkehrsverlagerung im Personenverkehr

Innerhalb des Modells TEMPS werden Vermeidung und Verlagerungen zu anderen Verkehrsträgern durch direkte Preiselastizitäten und darauf aufbauende Verlagerungen abgebildet. Die direkte Elastizität beschreibt, wie sich Energiepreisänderungen auf die Nachfrage eines bestimmten Verkehrsmittels auswirken.

Eine Preiselastizität der Nachfrage von -0,3 gibt beispielsweise an, dass eine Preiserhöhung um zehn Prozent die Verkehrsleistung um drei Prozent reduzieren würde. Wenn sich die Verkehrsleistung eines Verkehrsmittels reduziert, kann das zum einen an Verkehrsvermeidung liegen, zum anderen findet aber auch Verlagerung auf andere Verkehrsträger statt. Der Besetzungsgrad bleibt im Zeitverlauf konstant und somit auch die Beziehung zwischen Fahrleistung und Verkehrsleistung für Pkw und Motorrad.

In Tabelle 5 sind die direkten Elastizitäten für Verkehrsträger des Personenverkehrs dargestellt, während Tabelle 6 die Verlagerungen für die verschiedenen Verkehrsträger zeigt. Letztere ist so zu lesen, dass immer von Verkehrsträger der Spalte zu Verkehrsträger der Zeile verlagert wird. In Summe betragen alle Verlagerungen inklusive der Anteile der Vermeidung 100 %.

Tabelle 5: Direkte Preiselastizitäten im Personenverkehr

Verkehrsträger	Direkte Preiselastizität	Bezugsgröße im Modell	Abgeleitet aus Quelle:
Pkw	-0,3	Fahrleistung/ Personenkilometer	Hautzinger et al. 2004; Litman 2023
Motorrad	-0,3	Fahrleistung/ Personenkilometer	kongruent zu Pkw
Fernzug	-0,3	Personenkilometer	Günthel et al. 2018
Regionalzug	-0,6	Personenkilometer	Günthel et al. 2018
Tram	-0,75	Personenkilometer	Litman 2004
Linienbus	-0,75	Personenkilometer	Litman 2004
Fernbus	-0,75	Personenkilometer	Litman 2004
Flug (nat.)	-0,92	Personenkilometer	Peter et al. 2016
Flug (int.)	-0,76	Personenkilometer	Peter et al. 2016

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

In allen Fällen können die Elastizitäten in beide Richtungen wirken. So kann beispielsweise eine zunehmende Elektrifizierung des MIV und der damit einhergehende Wirkungsverlust von CO₂-abhängigen Preisinstrumenten langfristig zu einer Zunahme der Pkw-Verkehrsleistung führen. Dies lässt sich unter anderem damit begründen, dass die Nutzungskosten der Elektromobilität im Falle hoher CO₂ – Kosten deutlich geringer ausfallen als die eines Pkw-Bestandes mit einem höheren Anteil an Verbrennern. Die durchschnittlich niedrigeren Nutzungskosten der Elektromobilität gegenüber den Verbrennern führt mit zunehmender Marktdurchdringung zu insgesamt sinkenden Durchschnittskosten der Pkw-Nutzung und damit zu einer erhöhten Verkehrsnachfrage gegenüber dem Fall einer geringeren Elektrifizierung des Pkw-Bestandes.

Im MIV wirken Verlagerungen immer auf die Verkehrsleistung aller Pkw und werden vereinfacht nicht nach Größenklasse, Haltertyp oder Region unterschieden.

Text Box 2: Beispiel Verlagerung von Pkw auf andere Verkehrsträger

In einem Szenario wird der CO₂-Preis erhöht, wodurch die Kosten für fossile Kraftstoffe ansteigen. In einem ersten Schritt wird ermittelt wie sich die Preisänderung über alle Pkw, unabhängig vom Antrieb, verhält. Angenommen der Kraftstoffpreis nimmt im Mittel um zehn Prozent gegenüber der Referenz zu. Dies würde bedeuten, dass sich die Verkehrsleistung von Pkw um drei Prozent verringert. Von den drei Prozent werden zwölf Prozent zu Fernzug, 16 % zum Regionalzug, fünf Prozent zur Tram, elf Prozent zum Linienbus und sieben Prozent zum Fernbus verlagert. Die restlichen 41 % werden vermieden.

Tabelle 6: Verlagerungen im Personenverkehr von Spalte zu Zeile

Verkehrsträger	Pkw	Motorrad	Fernzug	Regionalzug	Tram	Linienbus	Fernbus	Flug (nat.)
Pkw	-	-	75 %	66 %	66 %	66 %	40 %	70 %
Motorrad	-	-	-	-	-	-	-	-
Fernzug	12 %	12 %	-	-	-	-	10 %	10 %
Regionalzug	16 %	16 %	-	-	-	-	-	-
Tram	5 %	5 %	-	-	-	-	-	-
Linienbus	11 %	11 %	-	-	-	-	-	-
Fernbus	7 %	7 %	2 %	-	-	-	-	-
Flug (nat.)	-	-	3 %	-	-	-	-	-
Fahrrad	7 %	7 %	-	10 %	10 %	10 %	-	-
Fuß	2 %	2 %	-	5 %	5 %	5 %	-	-
Vermeidung	41 %	41 %	20 %	19 %	19 %	19 %	50 %	20 %
Gesamt	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %

Quelle: Eigene Darstellung nach Intraplan (2017)

Beim Personenverkehr werden zusätzlich Kapazitätsengpässe auf der Schiene berücksichtigt. Sobald die aus NPM (2021) abgeleitete maximale Kapazität erreicht ist, werden zusätzliche 15 % der sonst auf die Schiene verlagerten Verkehrsleistung vermieden. Weitere 30 % werden bevorzugt auf andere Verkehrsträger wie Fernbusse, Linienbusse und Reisebusse verlagert. Dies erfolgt aufgrund der Annahme, dass Busbetreiber flexibler auf eine erhöhte Nachfrage reagieren können als der schienengebundene öffentliche Verkehr. Die restlichen 55 % können nicht verlagert werden.

2.4.2 Verkehrsverlagerungen im Güterverkehr

Beim Güterverkehr werden zur Vereinfachung nur Verlagerungen vom Straßenverkehr auf die Schiene und auf die Binnenschifffahrt betrachtet. Berücksichtigt werden bei den Nutzerkosten neben den Kraftstoffkosten auch anfallende Mautgebühren. Wie im Personenverkehr werden auch beim Straßengüterverkehr keine antriebsspezifischen Verlagerungen ausgewiesen. Die direkte Elastizität des Straßengüterverkehrs beträgt -0,6 (de Jong et al. 2010). Bei einer direkten

Elastizität von -0,6 wird davon ausgegangen, dass eine Preissteigerung um ein Prozent (pro km) einen Rückgang der Verkehrsleistung um 0,6 % (pro tkm) nach sich zieht. Anders als im Personenverkehr, wo die Kraftstoffkosten den größten Anteil an den Betriebskosten innehaben, spielen die Kraftstoffkosten im Straßengüterverkehr mit einem Anteil von rund einem Viertel an den gesamten Betriebskosten eine eher untergeordnete Rolle. Die Kosten für das Fahrpersonal sind hier deutlich relevanter. Anders als beim Personenverkehr findet im Güterverkehr eine Verlagerung zu 100 % statt, das heißt es gibt keine Verkehrsvermeidung durch Kosteneffekte. Von der preisinduzierten Verkehrsverlagerung werden 80 % auf die Bahn und 20 % auf die Binnenschifffahrt verlagert. Zusätzlich wird bei beiden Verkehrsträgern ein Umwegfaktor von 0,16 angenommen. Die auf die Bahn und Schifffahrt verlagerten Wege verlängern sich also um 16 %.

Bei einer Reduktion der Transportkosten durch zunehmende Elektrifizierung kann es zu einer Zunahme der Fahrleistungen kommen (Rebound). Auch bei höheren Transportkosten kann es zu einer Zunahme der Fahrleistung kommen, auch trotz verbesserter Auslastung und Routenplanung.

2.5 Endenergieverbrauch und Treibhausgasemissionen

Über die Bestandsmodellierung wird die Zusammensetzung der Flotte (Lkw und Pkw) nach Fahrzeugtyp bestimmt. Die Jahresfahrleistung aus den Nutzungsprofilen wird zunächst übernommen. Nutzungskosten wie beispielsweise die Kraftstoffpreise oder Mautgebühren haben einen direkten Einfluss auf die Verteilung der Fahrleistung nach Antrieben oder Effizienzen. Im Anschluss an die Bestandsmodellierung wird die gesamte Verkehrsnachfrage mit der in Kapitel 2.4 beschriebenen Verkehrsnachfrage kalibriert, wobei die Verteilung nach Größenklasse, Region, Halter, Antrieb und Effizienz erhalten bleibt.

Anschließend werden Verlagerungseffekte zu anderen Verkehrsträgern (siehe Kapitel 2.4.1) berücksichtigt.

Die Berechnung des Energieverbrauchs erfolgt direkt entlang des spezifischen Verbrauchs der Fahrzeuge der Bestandsflotte. Für die Berechnung der Treibhausgasemissionen werden Emissionsfaktoren genutzt, die die Emissionen bezogen auf den Energieverbrauch (bspw. tCO₂/MJ) beschreiben.

3 Analysen zur Lenkungswirkung von Endenergiepreisänderungen

Wie in Kapitel 2 erläutert beeinflussen Änderungen der Endenergiepreise sowohl die Kaufentscheidung und damit die Zusammensetzung des Bestands als auch die Verlagerung zwischen Verkehrsträgern. Im Folgenden wird anhand von vier Szenarien modelliert, wie sich konkrete Energiepreisänderungen auf die Verkehrsleistung, die Flottenzusammensetzung und schließlich die THG-Emissionen im nationalen Verkehr auswirken.

Als Referenz dient das „Mit Weiteren Maßnahmen Szenario“ (MWMS) des Projektionsberichts 2023 (Harthan et al. 2023). Das MWMS-Szenario beinhaltet alle bereits beschlossenen Klimaschutzmaßnahmen (Stand 31. August 2022), sowie das Deutschlandticket und die Erweiterung der Lkw-Maut um eine CO₂-abhängige Komponente in Höhe von 200 Euro/tCO₂. Eine detaillierte Beschreibung der Ausgestaltung des MWMS findet sich im Projektionsbericht 2023 (Harthan et al. 2023). Im Folgenden wird das MWMS-Szenario nur noch *Referenz* genannt.

In den folgenden Unterkapiteln wird zunächst die Ausgestaltung der Szenarien in Hinblick auf die Energiepreise beschrieben und die Energiepreisänderungen gegenübergestellt (siehe Kapitel 3.1.4). Anschließend werden die Ergebnisse der Szenarien im Detail dargestellt und ihre Lenkungswirkungen im Personen- und Güterverkehr analysiert.

3.1 Ausgestaltung der Szenarien (S)

Tabelle 7 zeigt die Abgrenzung der im Folgenden genauer definierten vier Szenarien.

Tabelle 7: Definition der Szenarien

Szenario	S1	S2	S3	S4
Änderung gegenüber Referenz	niedriger CO ₂ -Preis	hoher CO ₂ -Preis	angepasste Energiesteuer	minimale Stromsteuer
Beschreibung	Angleichung des BEHG an die Hälfte des Referenz-ETS1 ab 2027.	Angleichung des BEHG an das Doppelte des Referenz-ETS1 ab 2027.	Anhebung der Energiesteuer für fossile Kraftstoffe auf den Energiesteuersatz von Benzin (Phase in 2024-2026). Einführung eines Inflationsausgleichs ab 2026.	Absenkung der Stromsteuer ab 2024 auf den Mindestsatz aus der Energy Taxation Directive (ETD). Einführung eines Inflationsausgleichs ab 2024.

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

3.1.1 CO₂-Preisvariationen BEHG/ETS2 (Szenarien S1 + S2)

Der CO₂-Preis ist ein marktbasierendes Instrument, um CO₂-Emissionen zu senken, indem es der Emission von CO₂ einen Preis zuweist. Der CO₂-Preis wird im Verkehrssektor auf die Kraftstoffe umgelegt und bewirkt damit eine Preiserhöhung fossiler Kraftstoffe.

In den Szenarien S1 und S2 wird untersucht, wie sich eine Halbierung bzw. eine Verdopplung des CO₂-Preises gegenüber der Referenz im Verkehrssektor auswirken würde, um mögliche Anpassungsreaktionen im Verkehrssektor zu verdeutlichen. Die Preispfade in S1 und S2 entsprechen also ab 2027 der Halbierung bzw. der Verdopplung des Referenz EU ETS1. In

Tabelle 8 sind die CO₂-Preispfade der Referenz aus ETS1 und BEHG sowie die Preispfade der Szenarien S1 und S2 dargestellt.

Tabelle 8: CO₂-Preisfad in Szenarien Referenz, S1 und S2*

Jahr	Referenz EU ETS1 ⁵ Euro (nominal)/tCO ₂	Referenz BEHG/ETS2 Euro (nominal)/tCO ₂	S1 BEHG/ETS2 Euro (nominal)/tCO ₂	S2 BEHG/ETS2 Euro (nominal)/tCO ₂
2020	25	0	0	0
2021	54	25	25	25
2022	82	30	30	30
2023	93	30	30	30
2024	99	35	35	35
2025	108	45	45	45
2026	122	65	65	65
2027	127	80	64	254
2028	132	95	66	265
2029	138	110	69	275
2030	143	125	72	286
2031	150	140	75	301
2032	158	155	79	316
2033	166	170	83	331
2034	174	185	87	347
2035	182	200	91	364
2036	191	215	95	381
2037	199	230	100	399
2038	208	245	104	417
2039	218	260	109	436
2040	228	275	114	455
2041	235	290	118	471
2042	244	305	122	487
2043	252	320	126	504
2044	261	335	130	521
2045	269	350	135	539

⁵ European Trading System: EU-weites „Cap-and-Trade“- System zur Reduktion der CO₂-Emissionen insbesondere für die Sektoren Energiebereitstellung und Industrie.

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut *Anpassungen in blau markiert

3.1.2 Energiesteueranpassung für fossile Kraftstoffe (Szenario S3)

Im Szenario S3 wird eine Anhebung des Energiesteuersatzes für Diesel, Autogas und Methan ab 2024 phasenweise bis 2026 auf die Höhe des Energiegehalts von Benzin untersucht. Zusätzlich wird ab 2026 ein Inflationsausgleich und die Absenkung der Kfz-Steuer auf Niveau von Benzin-Pkw eingeführt. Die jährliche Inflation führt zu einer sukzessiven Abnahme der realen Steuerlast der Energiebesteuerung. Um diese Abnahme zu verhindern und die realen Steuersätze konstant zu halten, werden ab dem Jahr 2024 die nominalen Steuersätze gemäß der jährlichen Inflationsrate erhöht. Die Ausgestaltung des Energiesteuerpfads sind in Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9: Energiesteuerpfad für fossile Kraftstoffe in Szenario S3*

Jahr	Benzin in Euro 2022	Diesel in Euro 2022	Autogas in Euro 2022	Methan in Euro 2022
2020	71,0	51,1	21,1	19,7
2021	68,9	49,5	23,9	19,1
2022	65,4	47,1	26,1	18,1
2023	63,7	45,8	28,5	17,7
2024	62,2	53,5	36,9	32,9
2025	62,2	61,2	45,3	48,1
2026	62,2	68,7	53,7	63,3
2027	62,2	68,7	53,7	63,3
2028	62,2	68,7	53,7	63,3
2029	62,2	68,7	53,7	63,3
2030	62,2	68,7	53,7	63,3
2031	62,2	68,7	53,7	63,3
2032	62,2	68,7	53,7	63,3
2033	62,2	68,7	53,7	63,3
2034	62,2	68,7	53,7	63,3
2035	62,2	68,7	53,7	63,3
2036	62,2	68,7	53,7	63,3
2037	62,2	68,7	53,7	63,3
2038	62,2	68,7	53,7	63,3
2039	62,2	68,7	53,7	63,3
2040	62,2	68,7	53,7	63,3
2041	62,2	68,7	53,7	63,3

Jahr	Benzin in Euro 2022	Diesel in Euro 2022	Autogas in Euro 2022	Methan in Euro 2022
2042	62,2	68,7	53,7	63,3
2043	62,2	68,7	53,7	63,3
2044	62,2	68,7	53,7	63,3
2045	62,2	68,7	53,7	63,3

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut *Anpassungen in blau markiert

3.1.3 Anpassung der Strombesteuerung

Eine Senkung der Stromsteuer kann Elektromobilität (E-Mobilität) noch attraktiver machen. Insbesondere für Nutzungsprofile mit hohen Jahresfahrleistungen erhöht diese Maßnahme die ökonomische Attraktivität. Aktuell liegt die Höhe der Stromsteuer bei 2,05 ct/kWh. Laut dem Vorschlag für die Energy Tax Directive (European Commission (EC) 2021) könnte die Stromsteuer auf ein Minimum von 0,054 ct/kWh abgesenkt werden. In Tabelle 10 ist die Stromsteuer der Referenz sowie des Szenarios S4 in Euro₂₀₂₂/GJ dargestellt.

Tabelle 10: Stromsteuerpfad in Szenario Ref und S4

Jahr	Referenz In Euro ₂₀₂₂ / GJ	S4 In Euro ₂₀₂₂ / GJ
2020	6,2	6,17
2021	6,0	5,99
2022	5,7	5,69
2023	5,5	5,55
2024	5,4	0,19
2025	5,3	0,19
2026	5,2	0,19
2027	5,1	0,19
2028	5,0	0,19
2029	4,9	0,19
2030	4,8	0,19
2031	4,7	0,19
2032	4,6	0,19
2033	4,5	0,19
2034	4,4	0,19
2035	4,3	0,19
2036	4,2	0,19

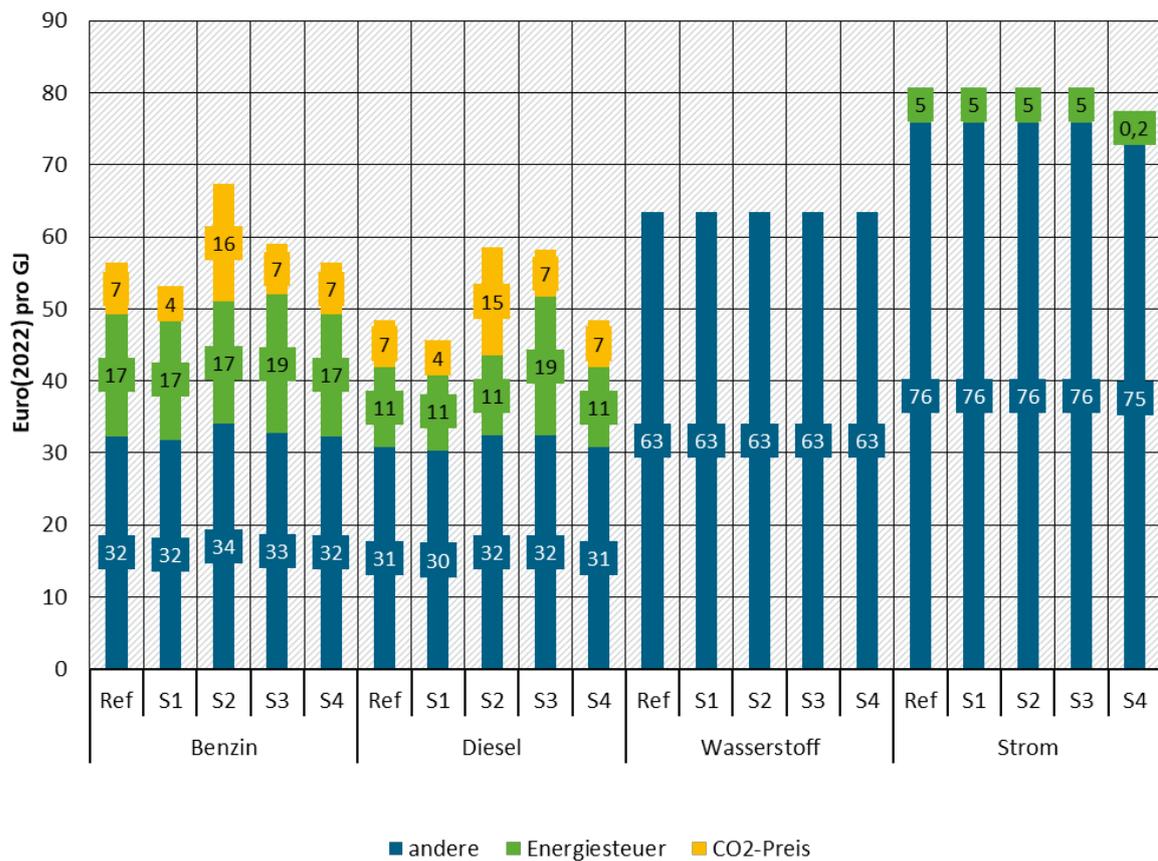
Jahr	Referenz In Euro ₂₀₂₂ / GJ	S4 In Euro ₂₀₂₂ / GJ
2037	4,1	0,19
2038	4,1	0,19
2039	4,0	0,19
2040	3,9	0,19
2041	3,8	0,19
2042	3,7	0,19
2043	3,7	0,19
2044	3,6	0,19
2045	3,5	0,19

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut *Anpassungen in blau markiert

3.1.4 Übersicht über die Szenarien

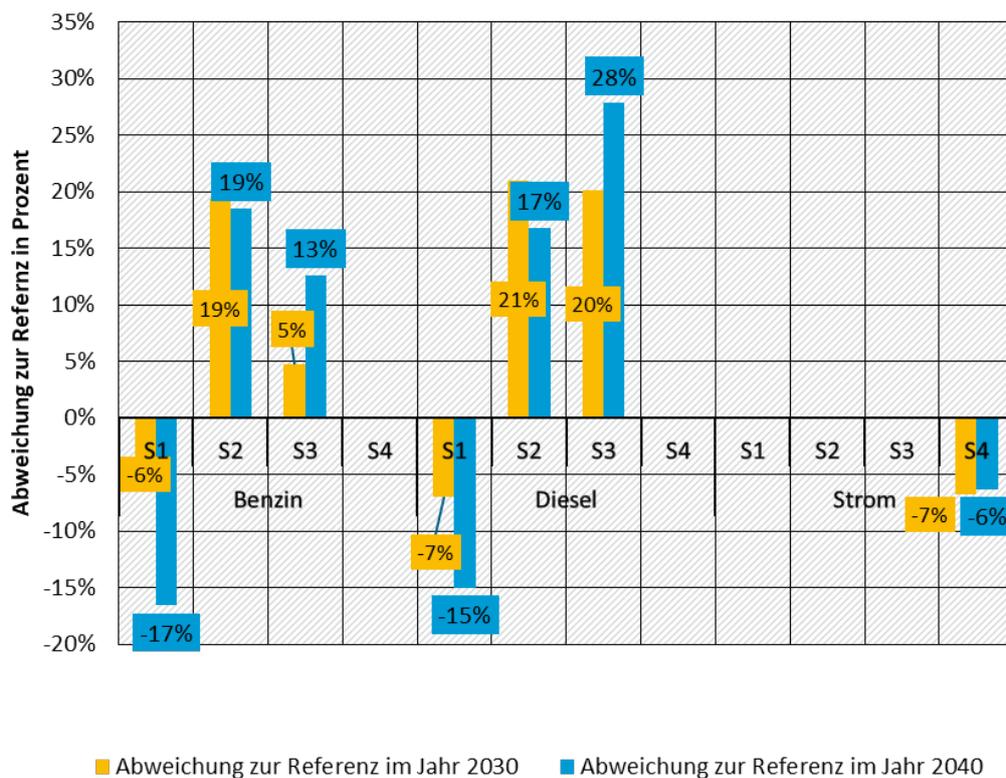
Die vier untersuchten Szenarien stellen unterschiedliche Ausgestaltungen der Energiepreisbestandteile dar. Um einen besseren Vergleich der Szenarien zu ermöglichen, sind in Abbildung 2 die Energiekosten von Benzin, Diesel, Wasserstoff und Strom für alle vier Szenarien sowie für das Referenzszenario im Jahr 2030 am Beispiel eines privaten Pkw dargestellt. Neben den Energiesteuern und dem CO₂-Preis umfasst die Kategorie „andere“ alle weiteren Energiepreisbestandteile wie bspw. Kosten für Herstellung und Transport. Während sich die Gesamtkosten von Benzin und Diesel in Szenarien S1, S2 und S3 verändern, ändert sich in Szenario S4 nur die Stromsteuer. Der Wasserstoffpreis bleibt über alle Szenarien konstant.

Abbildung 2: Energiepreisbestandteile aller Szenarien im Jahr 2030 am Beispiel für private Pkw



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Abbildung 3 zeigt die relative Veränderung der gesamten Energiekosten in den Szenarien gegenüber der Referenz für das Jahr 2030 und 2040. Im S2 Szenario steigen die Energiekosten gegenüber der Referenz im Jahr 2030 für Benzin um 19 % und für Diesel um 21 %. Die Steigerung für Dieselkraftstoff im S3 Szenario erreicht eine ähnliche Höhe wie im S2 Szenario, während der Benzinpreis mit fünf Prozent nur marginal steigt. Die Preisimpulse im S2 Szenario sind im Jahr 2030 also (etwas) größer als im Szenario S3. Im Jahr 2040 wiederum ist die Preissteigerung für Diesel im S3 Szenario mit 28 % deutlich höher als im S2 Szenario mit 17 %. Während die Preissteigerung für Benzin im Jahr 2040 im Szenario S2 mit 19 % gegenüber der Referenz höher ausfällt als im S3 Szenario. Im Szenario S1 liegen die Preise im Jahr 2030 sowie 2040 für Benzin und Diesel deutlich unter der Referenzentwicklung.

Abbildung 3: Änderung der Energiepreise gegenüber der Referenz im Jahr 2030

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

3.2 Ergebnisse/Lenkungswirkung der Szenarien

Text Box 3: Instrumentenwirkung in der Referenz

In der Referenz wirken bereits eine Vielzahl an Politikinstrumenten im Verkehrssektor, die einen erheblichen Beitrag zur Transformation und der CO₂-Minderung im Verkehrssektor im Zeitverlauf leisten. Eine detaillierte Diskussion, der in der Referenz bereits wirkenden Instrumenten- und Maßnahmenbündel, kann dem Projektionsbericht der Bundesregierung für das Jahr 2023 entnommen werden (Harthan et al. 2023).

3.2.1 CO₂-Preisvariationen BEHG/ETS2 (Szenarien S1 + S2)

Die Änderung des CO₂-Preises wirkt auf die Betriebskosten von Pkw und Lkw. Dies hat sowohl Auswirkungen auf die Verlagerung von Verkehrsleistung zwischen Verkehrsträgern als auch auf die Kaufentscheidung.

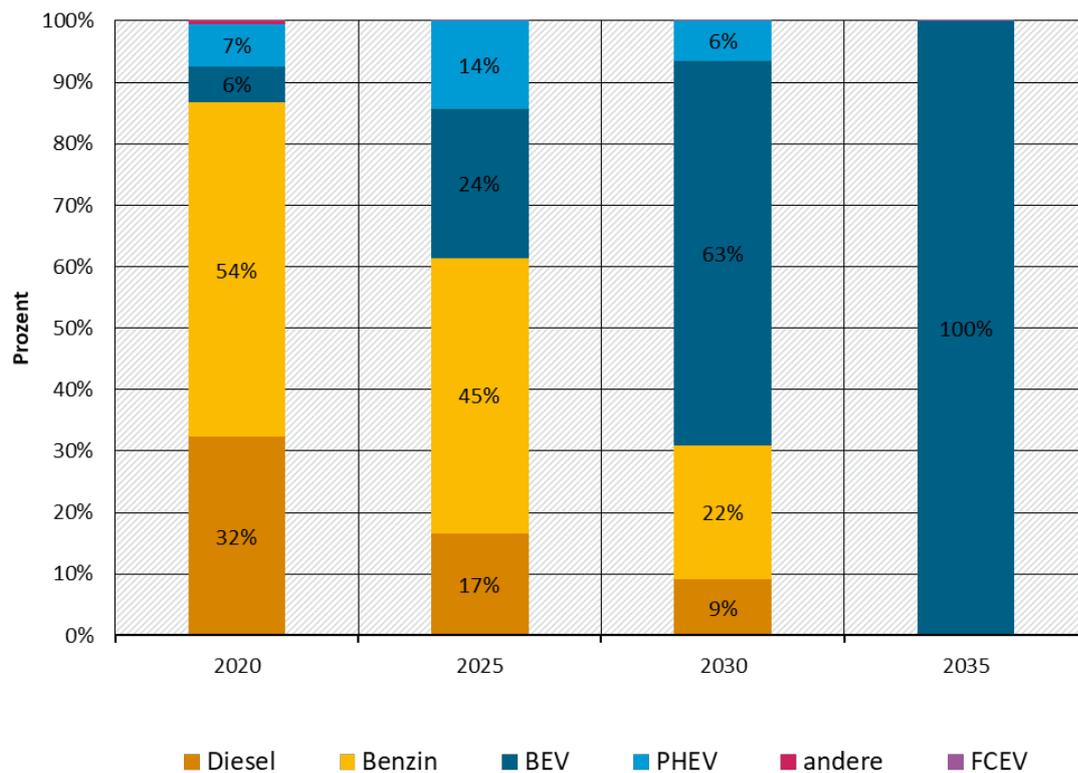
Wie in Kapitel 2.2 bzw. Abbildung 1 dargestellt, gehen die Betriebskosten über eine Nutzungsdauer von drei Jahren in die TCO bei Pkw ein. Da sie aber nur einen kleineren Anteil der TCO ausmachen, wirkt sich eine Änderung der Kraftstoffkosten nur geringfügig auf die Kaufentscheidung aus. Dies ist besonders bei Pkw der Fall, da hier die Kraftstoffkosten aufgrund einer geringen Jahresfahrleistung schwächer ins Gewicht fallen als beispielsweise bei schweren Nutzfahrzeugen.

Darüber hinaus sind bei den Pkw die verschärften Flottenzielwerte aktiv. Diese schreiben die erlaubten durchschnittlichen Emissionen pro Kilometer einer Flotte eines Herstellers vor. Es

wird angenommen, dass Hersteller einen Aufschlag auf den Kaufpreis stark emittierender Fahrzeuge und eine Kostenreduktion emissionsfreier Antriebe festlegen, sodass die Hersteller die Flottenzielwerte einhalten. Die Folge ist: die Flottenzielwerte sorgen bereits für finanzielle Anreize für den Verkauf bzw. Kauf emissionsfreier Antriebe. Dadurch wird der zusätzliche Kosteneffekt durch den CO₂-Preis teilweise überdeckt bzw. Hersteller müssen weniger stark über ihr internes Preisschema ihre Verkäufe steuern.

In Abbildung 4 ist die Neuzulassungsstruktur für Pkw im Referenz-Szenario dargestellt. Wie bereits erläutert unterscheiden sich die Neuzulassungen in S1 und S2 nur marginal von der Referenz und sind daher nicht in der Abbildung dargestellt. Tabelle 11 zeigt die Bestandszahlen für Pkw im Jahr 2030. Während sich die Anzahl der BEVs in S1 um rund 16.000 Fahrzeuge verringert (-0,2 %), kommen in S2 rund 100.000 BEVs (+1,2 %) dazu. Hier ist erkennbar, dass die Flottenzielewerte in S1 einer weiteren Verringerung der BEVs entgegenwirken.

Abbildung 4: Neuzulassungsanteile im Referenzszenario



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

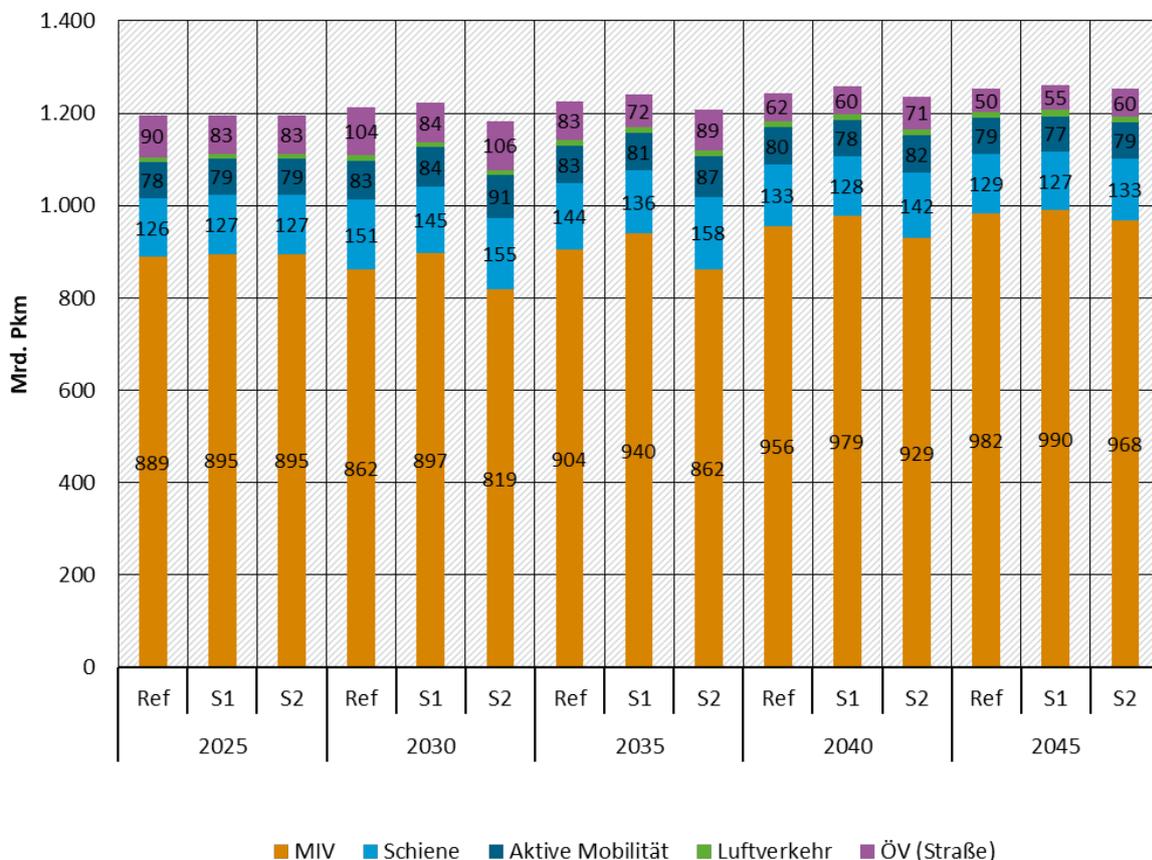
Tabelle 11: Pkw Bestand in Mio. Fahrzeugen in Szenario Referenz, S1 und S2 im Jahr 2030

Szenario	Diesel	Benzin	BEV	PHEV	andere
Ref.	9,96	27,60	8,31 ⁶	3,61	0,17
S1	9,96	27,59	8,3	3,76	0,17
S2	9,84	27,6	8,41	3,49	0,18

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Die veränderten Kraftstoffpreise wirken sich auch auf den Modal Split der Personenverkehrsnachfrage aus, welche in Abbildung 5 dargestellt ist. Durch die Erhöhung des CO₂-Preises in S2 steigen die Kilometerkosten von Pkw und infolgedessen wird mehr Verkehr auf den Umweltverbund verlagert. Schon im Jahr 2030 wird durch die starke Verlagerung die maximale Kapazität auf der Schiene erreicht. In Folge wird modellseitig weniger Verkehr vom MIV auf die Schiene verlagert und mehr auf den straßengebundenen ÖPNV. Im Szenario S1 kommt es durch den niedrigeren CO₂-Preis gegenüber der Referenz zu weniger Verlagerung vom MIV auf andere Verkehrsträger. Besonders nach 2040 nimmt die Differenz der Verlagerung zwischen den Szenarien ab, da in allen Szenarien die Flotten bereits stark elektrifiziert sind und die Wirkung des CO₂-Preises entsprechend nachlässt.

Abbildung 5: Personenverkehrsnachfrage in den Szenarien S1 und S2



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

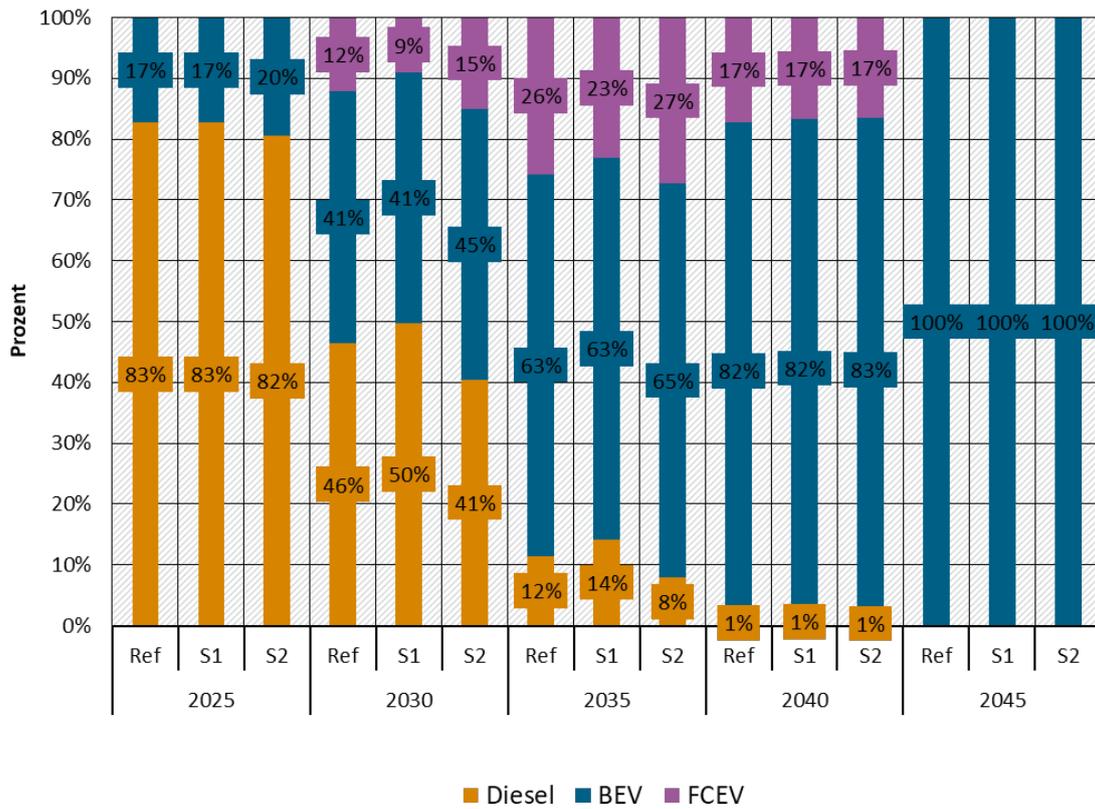
⁶Im Projektionsbericht 2024 werden im Jahr 2030 bereits 10,7 Mio. BEV erreicht. Dies ist unter anderem durch eine Anpassung der Annahmen zum Zielerreichungspfad der EU-Pkw-Flottenzielwerte begründet (Harthan et al. 2024).

Im Güterverkehr wirkt der CO₂-Preis auf einen großen Teil der Flotte, die zunächst fast ausschließlich aus Dieselfahrzeugen besteht. Wie in Kapitel 2.2.3 beschrieben, ist im Güterverkehr die Besonderheit, dass der Markthochlauf von BEVs maßgeblich vom Ladeinfrastrukturausbau abhängt, da BEVs aus rein ökonomischer Sicht, je nach Nutzungsprofil, schon den günstigsten Antrieb darstellen. Für Lkw bedarf es eines flächendeckenden Ausbaus von Schnellladeoptionen entlang der Autobahnen bzw. Logistikzentren. Damit können die Streckenanforderungen mit batterieelektrischen Fahrzeugen erfüllt werden. Während in Szenario S1 der gleiche Ladeinfrastrukturhochlauf unterstellt wird wie in der Referenz, wird in S2 sowie S3 ein schnellerer, kosteninduzierter Markthochlauf für Ladeinfrastruktur angenommen. Es wird davon ausgegangen, dass die steigenden Preise auf fossile Kraftstoffe den Markthochlauf für Ladeinfrastruktur ankurbeln.

Wie in Abbildung 6 zu sehen, wird in der Referenz die, durch Ladeinfrastrukture restriktionen begrenzte, maximale Zahl an BEVs erreicht. Dies liegt vor allem an der CO₂-abhängigen Lkw-Mautkomponente, welche in der Referenz bereits wirkt. Pro emittierter Tonne CO₂ zahlen Diesel-Lkw einen Abschlag von maximal 200 Euro, solange der CO₂-Preis weniger als 200 Euro beträgt. Der beim Tanken bereits gezahlte CO₂-Preis wird entsprechend zurückerstattet, sodass maximal 200 Euro pro Tonne CO₂ gezahlt werden. Sollte der CO₂-Preis über 200 Euro steigen, so fallen auch für Emittierende-Lkw Kosten über 200 Euro pro Tonne an.⁷ Dieses Instrument führt bereits zu einem starken Kostenanreiz für Nullemissions-Lkw, insbesondere BEV. Weitere Kostenanreize, wie ein höherer CO₂-Preis, haben dadurch wenig Wirkung auf die Neuzulassungsanteile von BEVs, sondern wirken lediglich auf die Verkehrsverlagerung. Wie in Abbildung 6 zu sehen, steigt der Anteil der BEVs im Szenario S2 oder auch S3 nur leicht, bedingt durch den schnelleren Markthochlauf der Ladeinfrastruktur. Allerdings werden durch den zusätzlichen finanziellen Anreiz vermehrt FCEVs ab dem Jahr 2030 zugelassen. Hier werden in S2 rund 15 % Neuzulassungsanteil erreicht, während ihr Anteil in S1 auf neun Prozent sinkt (Referenz: 12 % in 2030). Wie auch bei den Pkw nimmt die Wirkung der CO₂-Preis Änderung mit einer zunehmenden Elektrifizierung der Flotte ab.

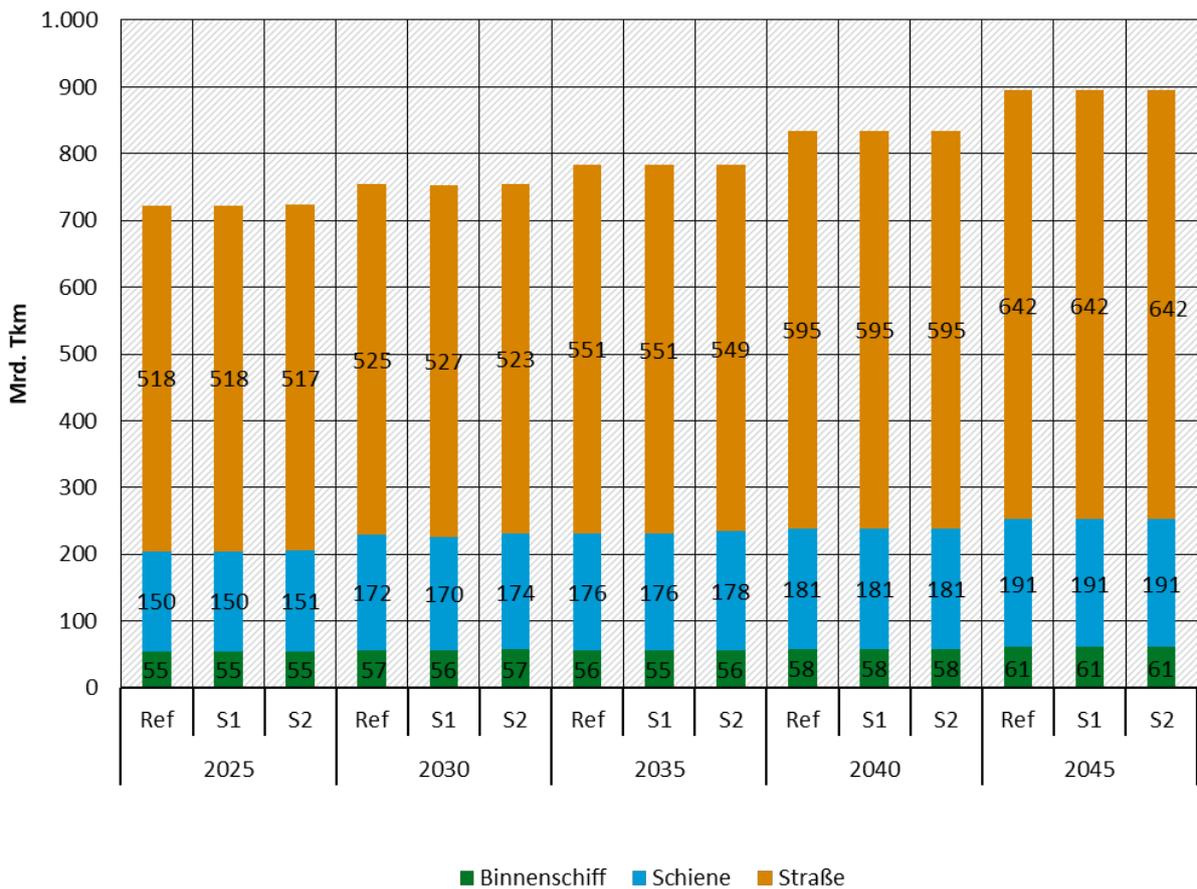
⁷ Diese Ausgestaltung entspricht dem Stand des Projektionsberichts 2023. Die derzeit gültige Umsetzung sieht keinen Rückerstattungsmechanismus vor, sodass der beim Tanken anfallende CO₂-Preis sowie die 200 Euro pro Tonne CO₂ als Bestandteil der Lkw-Maut gezahlt werden müssen.

Abbildung 6: Neuzulassungsanteile von Lkw > 12 Tonnen in den Szenarien S1 und S2



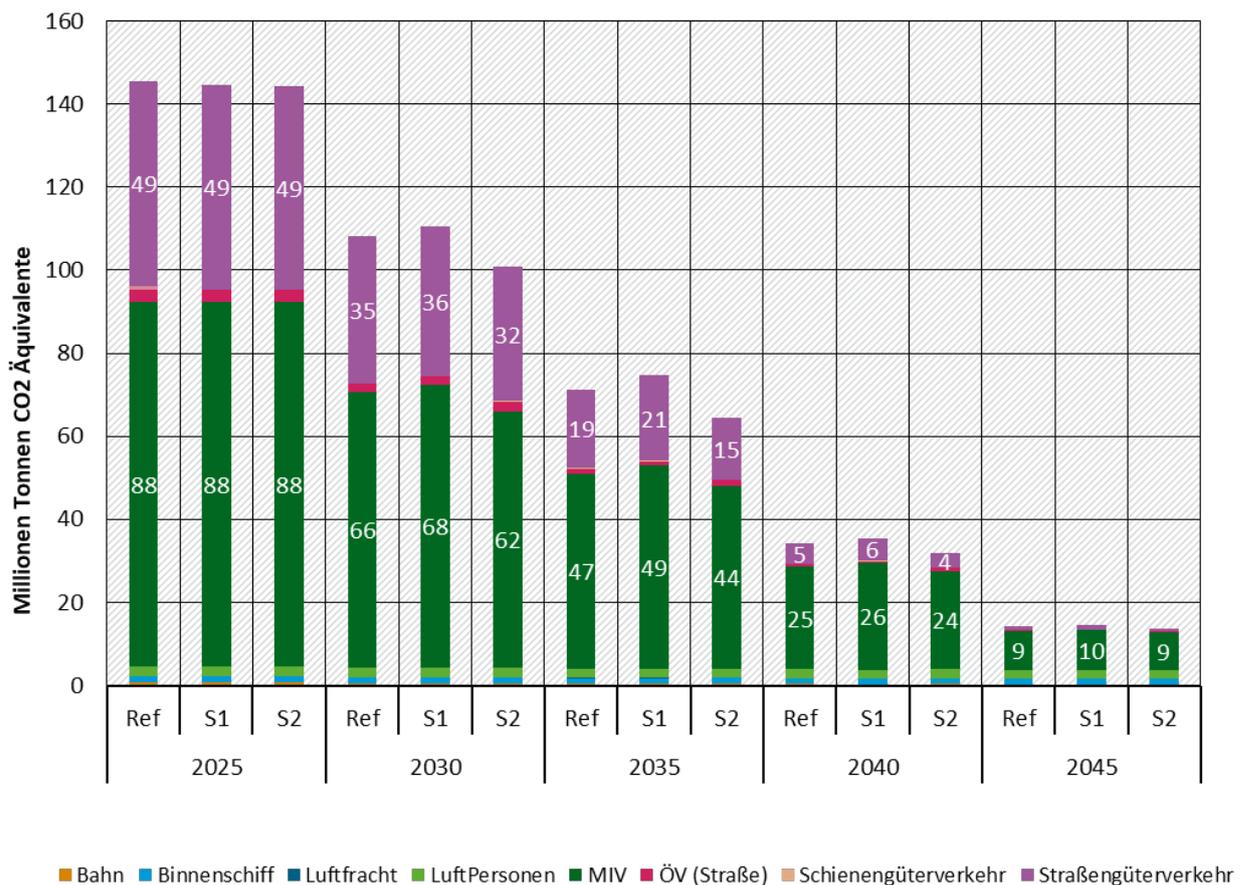
Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Beim Güterverkehr gibt es insgesamt weniger Verlagerung auf andere Verkehrsträger als beim Personenverkehr. In Abbildung 7 ist allein in S2 eine leichte Verschiebung hin zur Schiene und zur Binnenschifffahrt erkennbar.

Abbildung 7: Güterverkehrsleistung in den Szenarien S1 und S2

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Wie in Abbildung 8 und Tabelle 12 zu sehen, steigen die THG-Emissionen bis 2030 um zwei Prozent im Szenario S1 auf 110,4 Mio. tCO₂-Äq. In S2 sinken sie bis 2030 um rund fünf Prozent auf 100,7 Mio. tCO₂-Äq. Den größten Anteil an der Emissionsänderung hat der MIV und der Straßengüterverkehr. Die leichte Emissionsminderung in S2 im Jahr 2025 ist allein auf den etwas schnelleren Ausbau der Ladeinfrastruktur für batterieelektrische Fahrzeuge zurückzuführen. In beiden Szenarien werden die Sektorziele für den Verkehr nach Bundesklimaschutzgesetz deutlich verfehlt. Bis 2045 nimmt die Differenz zwischen den Szenarien aufgrund der Elektrifizierung der Flotten im Personen- und Güterverkehr stark ab. Zum Teil ist diese Angleichung durch die mit der Zeit zunehmende Elektrifizierung zu erklären, welche bereits in der Referenz enthalten ist.

Abbildung 8: THG-Emissionen in den Szenarien S1 und S2

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Tabelle 12: THG-Emissionen in den Szenarien S1 und S2 (in Mio. t CO₂-Äq)

Szenario	2025	2030	2035	2040	2045
Referenz	144,3	107,6	71,7	34,9	14,6
Sektorziele (Verkehr)	123	85	-	20 ⁸	0
S1	144,3	110,4	74,7	35,5	14,6
S2	144,3	100,7	64,3	31,8	13,7

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

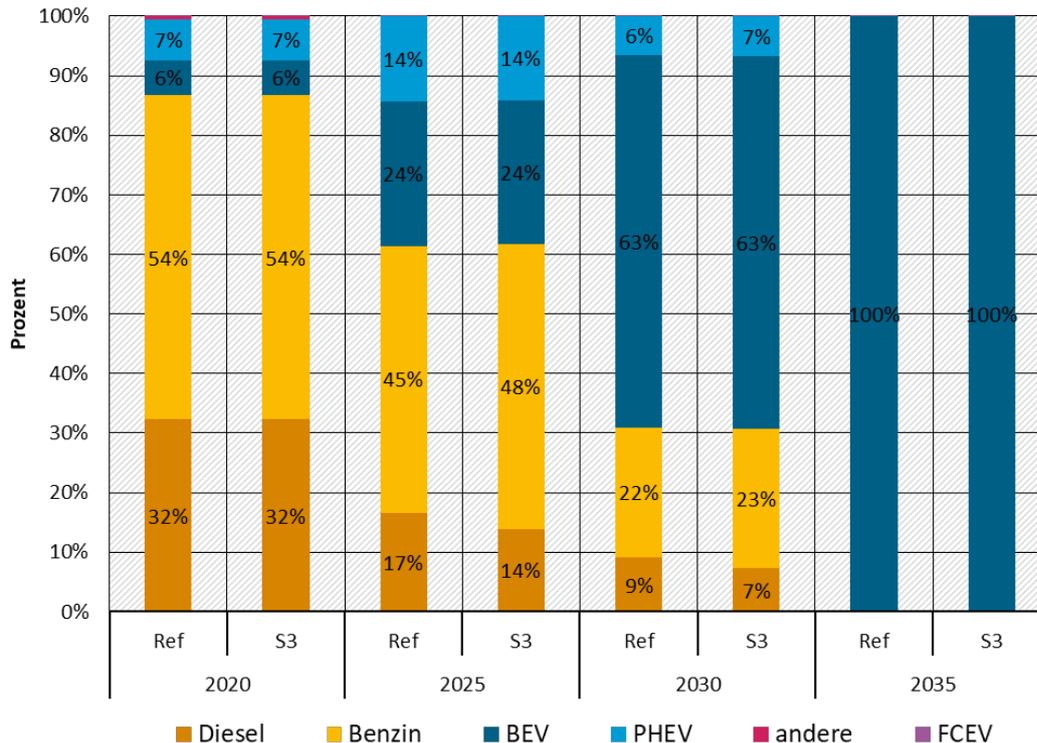
3.2.2 Energiesteueranpassung (Szenario S3)

Die Erhöhung der Energiesteuer und die Einführung eines Inflationsausgleichs für fossile Kraftstoffe wirkt sehr ähnlich wie die Anpassung des CO₂-Preises (siehe Kapitel 3.1.1). Aufgrund der Flottenzielwerte für Pkw und der geringen Wirkung von Energiepreisänderungen in der Kaufentscheidung, ändern sich die Neuzulassungsanteile für Pkw nur marginal (für eine genauere Erklärung siehe Kapitel 3.1.1). Im Jahr 2030 befinden sich in S3 rund 60.000 BEVs

⁸ Die Sektorziele sind im Bundesklimaschutzgesetz nur bis zum Jahr 2030 sektorspezifisch numerisch genau definiert. Jedoch müssen die Emissionen bis zum Jahr 2040 um mindestens 88 % gegenüber dem Jahr 1990 sinken. Daraus ergibt sich der Zielwert im Jahr 2040. Für das Jahr 2045 wird Treibhausgasneutralität hinterlegt.

mehr im Pkw-Bestand and in der Referenz (siehe Tabelle 13). Wie in Abbildung 9 zu sehen ergibt sich aber, anders als in Szenario S2, durch die stärkere Anpassung der Kosten für Diesel gegenüber Benzin, eine Verschiebung hin zu Benzinfahrzeugen.

Abbildung 9: Vergleich der Pkw Neuzulassungsanteile in Szenario S3



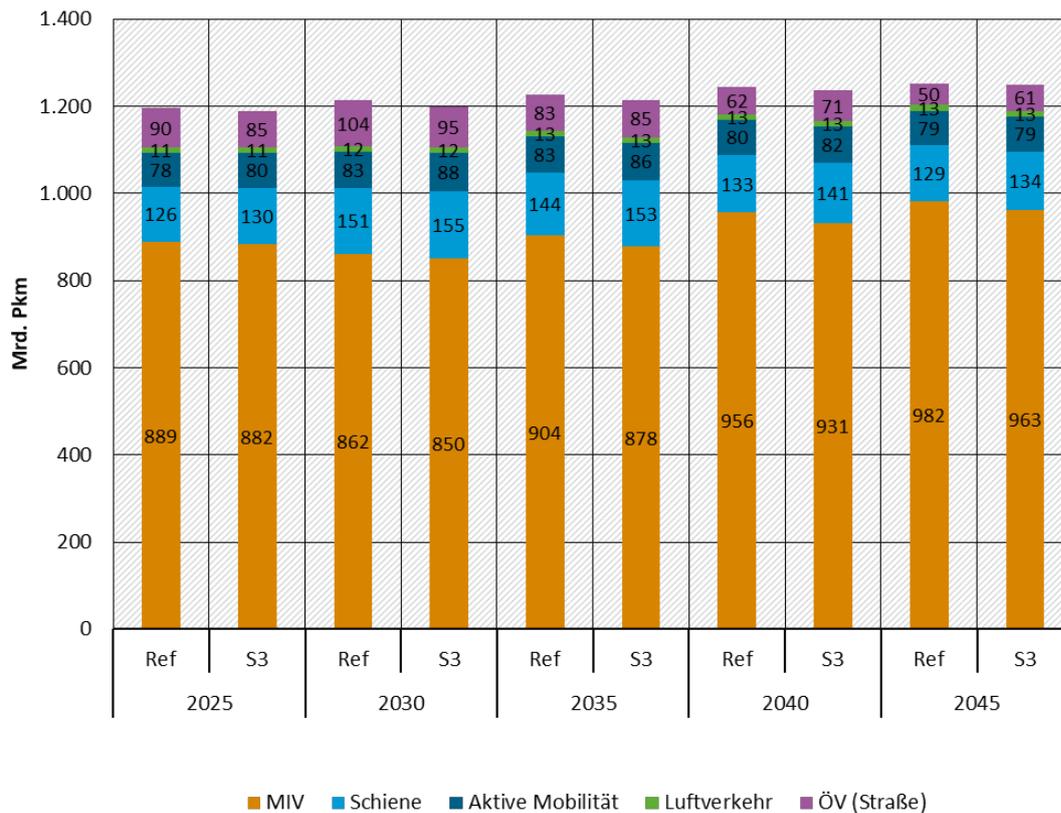
Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Tabelle 13: Pkw-Bestand im Jahr 2030 im Szenario S3 (in Mio. Fahrzeugen)

Szenario	Diesel	Benzin	BEV	PHEV	andere
Referenz	9,95	27,60	8,20	3,74	0,17
S3	9,40	28,17	8,26	3,66	0,17

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

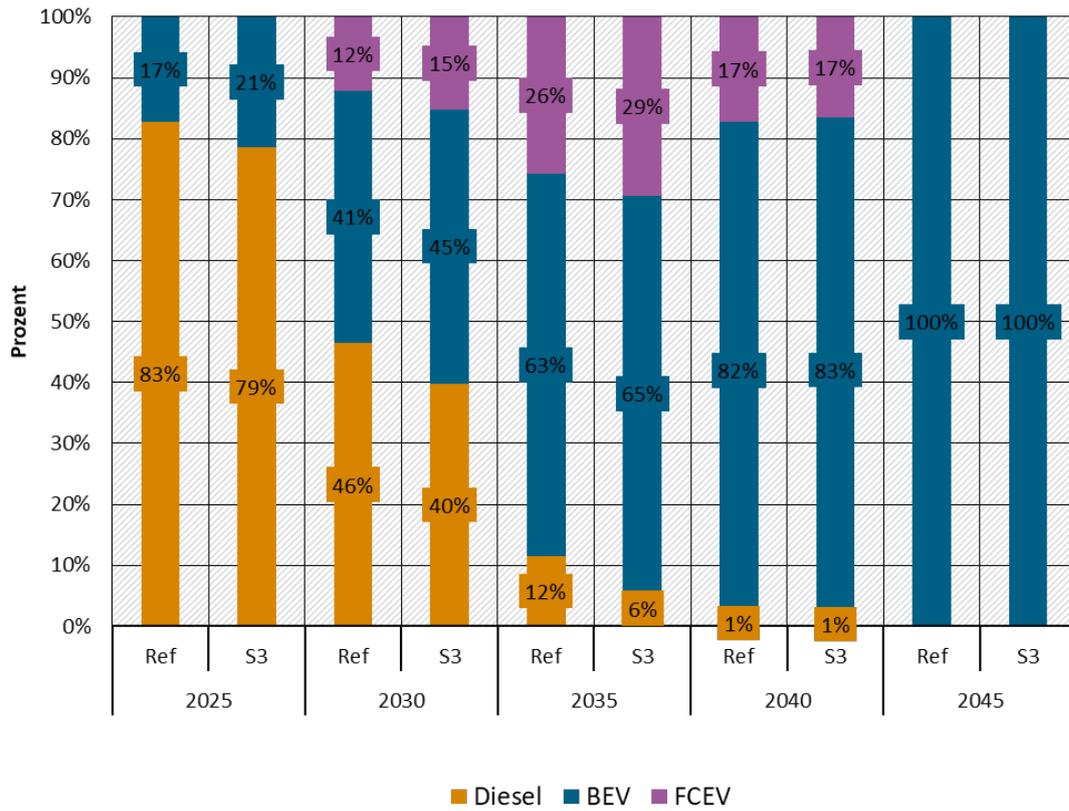
Ähnlich wie in Szenario S2 zeigen die gestiegenen Kilometerkosten für Pkw bei der Verkehrsnachfrage eine deutliche Wirkung, siehe Abbildung 10. Im Jahr 2030 wird bereits die maximale Verlagerung auf die Schiene erreicht. In Folge wird mehr auf den straßengebundenen ÖPNV verlagert. Während die Verlagerung von MIV auf die Schiene in Szenario S2 bis zum Jahr 2035 noch zunimmt (auf 169 Mrd. Pkm auf der Schiene), nimmt die Verlagerung im Szenario S3 bis 2035 wieder ab, auf 153 Mrd. Pkm. Während die Kostensteigerung in S2 durch den steigenden CO₂-Preis weiter zunimmt, findet in S3 nach 2030 nur noch eine Kostensteigerung durch den Inflationsausgleich statt.

Abbildung 10: Vergleich der Verkehrsleistung im Personenverkehr in Szenario S3

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

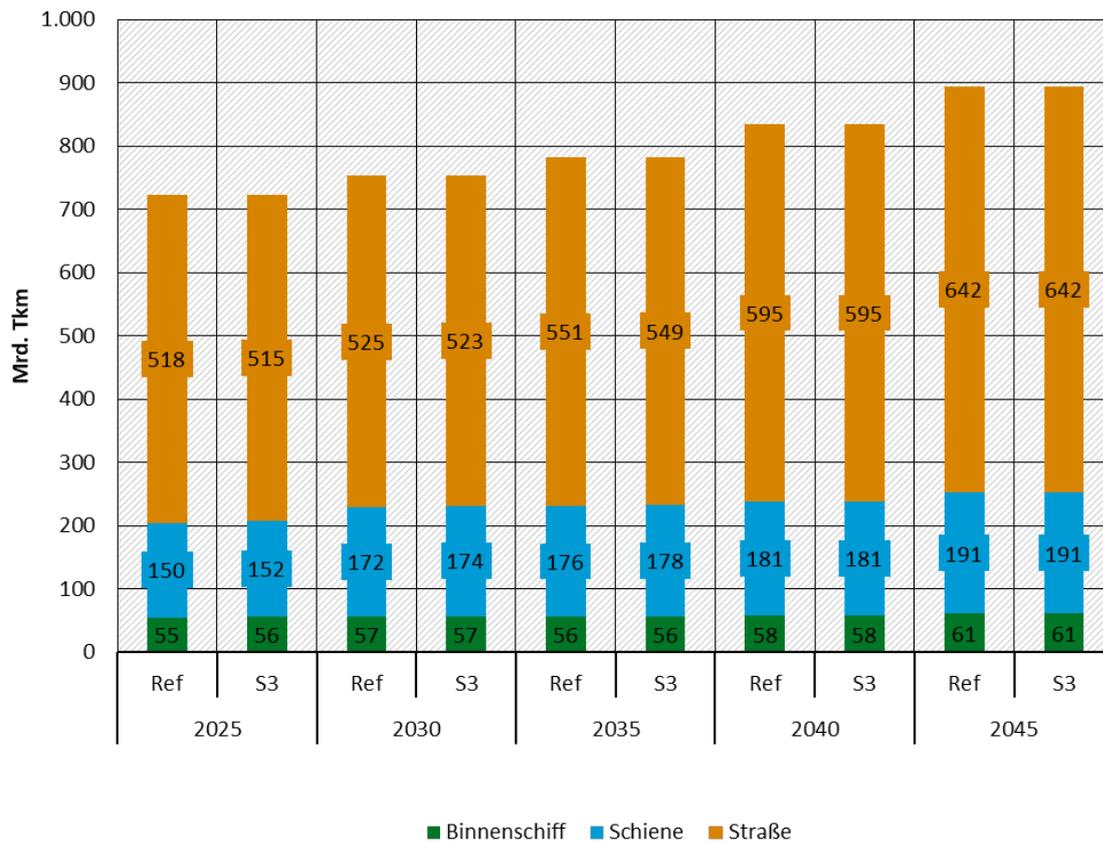
Beim Güterverkehr hat die Energiesteueranpassung eine ähnliche Wirkung wie die höheren CO₂-Preise im Szenario S2. Die Neuzulassungsanteile batterieelektrischer Lkw sind durch die Ladeinfrastrukturrestriktionen begrenzt, siehe Abbildung 11. Analog zu S2 wird in Szenario S3 ein beschleunigter Ausbau der öffentlichen Ladeinfrastruktur gegenüber der Referenz angenommen (für eine detailliertere Beschreibung siehe Kapitel 3.2.1). In Folge steigt der Neuzulassungsanteil von BEVs im Jahr 2030 um drei Prozentpunkte, während der Neuzulassungsanteil von FCEVs um rund zwölf Prozentpunkte gegenüber der Referenz steigt. Mit der zunehmenden Elektrifizierung der Flotte schwindet auch hier die Wirkung der Maßnahme bis 2040 auf nahezu null.

Abbildung 11: Neuzulassungsanteile Lkw > 12 Tonnen in Szenario S3



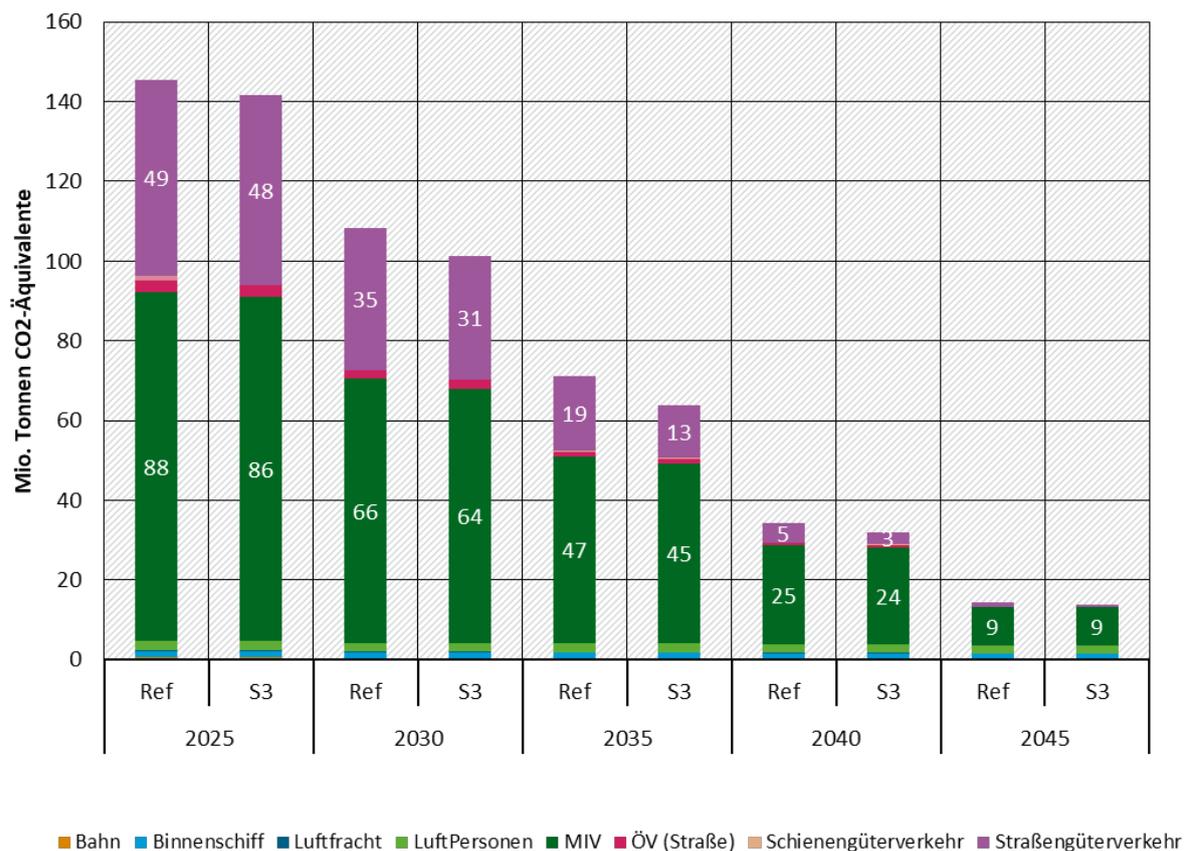
Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Bei der Güterverkehrsleistung (Abbildung 12) ist wie in Szenario S2 eine leichte Verlagerung vom Straßengüterverkehr zur Schiene zu beobachten.

Abbildung 12: Güterverkehrsleistung in Szenario S3

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Abbildung 13 und Tabelle 14 zeigen die nationalen THG-Emissionen im Szenario S3 und S2 gegenüber der Referenz. Durch die Anpassung der Energiesteuer ab 2024 kommt es in Szenario S3 zu einer früheren Elektrifizierung der Flotte als in S2. Bereits im Jahr 2025 kommt es zu einer Minderung von zwei Prozent gegenüber der Referenz. Im Jahr 2030 sind es sechs Prozent Minderung gegenüber der Referenz (im Vergleich: beim Szenario S2 beträgt die Minderung fünf Prozent). Die kumulierten Emissionsminderungen gegenüber der Referenz bis 2030 betragen im Szenario S3 rund 33 Mio. tCO₂-Äq., während sie in S2 nur rund 30 Mio. tCO₂-Äq. betragen. Betrachtet man jedoch den Zeitraum bis zum Jahr 2045 betragen die kumulierten Emissionsminderungen im S2 Szenario rund 103 Mio. tCO₂-Äq gegenüber rund 100 Mio. tCO₂-Äq im S3 Szenario.

Abbildung 13: THG-Emissionen in Szenario S3

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Tabelle 14: THG-Emissionen in Szenario S3 und S2 (in Mio. tCO₂-Äq)

Szenario	2025	2030	2035	2040	2045
Referenz	144,3	107,6	71,7	34,9	14,6
S3	141,7	101,2	63,7	32,0	14,0
S2	144,1	100,7	64,3	31,8	13,7

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Während in S2 die Wirkung des stetig steigenden CO₂-Preises auch nach 2030 zunimmt und zu Verlagerungen führt, wirkt in S3 nach der vollständigen Angleichung der Energiebesteuerung nur noch der Inflationsausgleich zusätzlich. Dadurch hat der CO₂-Preis langfristig gesehen eine stärkere Wirkung als die Energiesteueranpassung und erreicht im Jahr 2045 die niedrigsten Emissionen der hier evaluierten Szenarien.

3.2.3 Anpassung der Strombesteuerung

Durch die Anpassung der Strombesteuerung und das Einführen eines Inflationsausgleichs sinkt der Strompreis um sieben Prozent gegenüber der Referenz im Jahr 2030, siehe Abbildung 3. Durch die Flottenzielwerte werden bereits deutliche Anreize für batterieelektrische Fahrzeuge gesetzt, sodass die Anpassung der Strombesteuerung fast keinen Einfluss auf die Neuzulassungsstruktur hat (für eine genauere Beschreibung der Wirkung der Flottenzielwerte siehe Kapitel 3.2.1). Bis 2030 kommen in Szenario S4 lediglich 35.000 mehr BEV-Fahrzeuge in den Bestand.

Auch bei den Lkw wird die Wirkung der Stromsteueranpassung durch die bereits starken preislichen Effekte der Flottenzielwerte und der Lkw-Maut überdeckt (für eine genauere Beschreibung der Wirkung der Lkw-Maut siehe Kapitel 3.2.1). Im Jahr 2030 sind in Szenario S4 rund drei Prozent mehr BEVs im Bestand als in der Referenz.

Auch auf die Personen- und Güterverkehrsleistung hat die Stromsteueranpassung nur einen geringen Effekt. In Tabelle 15 ist die absolute Differenz der Personenverkehrsleistung zwischen S4 und Referenz in Personenkilometern dargestellt. Mit der zunehmenden Elektrifizierung der Flotte sinken die Nutzungskosten für Pkw durch die Anpassung der Stromsteuer. Als Resultat kommt es zu weniger Verlagerung auf die Schiene sowie auf andere Verkehrsträger. Obwohl auch weniger von der Schiene auf andere Verkehrsmittel verlagert wird (siehe der Zuwachs in 2025), wird dieser Effekt durch die reduzierte Verlagerung vom MIV bereits im Jahr 2030 überdeckt.

Tabelle 15: Differenz der Personenverkehrsleistung im Szenario S4 gegenüber der Referenz (in Pkm)

Jahr	MIV	Schiene	Aktive Mobilität	ÖV (Straße)
2025	0,8	0,1	-0,2	-0,1
2030	3,1	-0,6	-0,4	-0,6
2035	6,5	-1,6	-0,6	-1,4
2040	9,7	-2,4	-0,9	-2,1
2045	11,0	-2,9	-1,0	-2,5

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Beim Güterverkehr wirkt sich die Stromsteueranpassung ähnlich aus wie im Personenverkehr, jedoch deutlich weniger ausgeprägt. Im Jahr 2030 werden hier 0,3 Mrd. Tkm weniger von der Straße auf andere Verkehrsträger verlagert, im Jahr 2045 sind es dann 0,8 Mrd. Tkm.

Tabelle 16 zeigt die nationalen CO₂-Emissionen der Referenz und des Szenarios S4. Insgesamt kommt es zu einer Minderung von 0,3 Mio. t CO₂-Äq. im Jahr 2030. Im Jahr 2035 wächst die Differenz zwischen S4 und Referenz auf 0,8 Mio. t CO₂-Äq. Im Jahr 2045 hat die Anpassung der Strombesteuerung keinen Effekt mehr, da die Flotte bereits vollständig elektrifiziert ist.

Tabelle 16: nationale CO₂-Emissionen in Mio. Tonnen CO₂ Äquivalente in Szenario S4

Szenario	2025	2030	2035	2040	2045
Referenz	144,3	107,6	71,6	34,9	14,6
S4	144,1	107,3	70,8	34,0	14,3

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

3.2.4 Zusammenfassung und Vergleich

Nachfolgend werden die Ergebnisse der vier verschiedenen Szenarien miteinander verglichen und induzierte Anpassungsreaktionen ex-post für Lkw und Pkw in den jeweiligen Szenarien abgeleitet (siehe Tabelle 17).

Text Box 3: Induzierte Anpassungsreaktion

Anders als klassische Preiselastizitäten, die hier als Modellinput genutzt werden, lassen sich anhand der Szenarioergebnisse ex-post Anpassungsreaktionen der verschiedenen Akteure an veränderte Endenergiepreise berechnen, um eine Aussage über den direkten Zusammenhang zwischen Energiepreisänderungen und beispielsweise THG-Emissionen in den jeweiligen Szenarien zu erhalten. Diese, hier als induzierte Anpassungsreaktionen bezeichneten, Kennzahlen sind jedoch nur im Kontext des jeweiligen Szenarios, dem betrachteten Jahr und den damit einhergehenden Rahmenbedingungen und Wechselwirkungen zu interpretieren und können nicht generalisiert werden.⁹

Während die direkte Preiselastizität im Modell die Anpassungsreaktion der Akteure auf eine Energiepreisänderung in Bezug auf die Verkehrsleistung darstellt (die Entscheidung, wie viel gefahren/transportiert wird und indirekt auch verlagert wird), umfasst die induzierte Anpassungsreaktion auch die eher langfristige Entscheidung der Antriebswahl.

Tabelle 17: Induzierte Anpassungsreaktionen für Kraftstoffe im Bereich Verkehr differenziert nach ausgewählten Verkehrsträgern für das Jahr 2030

Verkehrsträger	Direkte Preiselastizität (Effekt der Endenergiepreisänderung auf Verkehrsleistung)	Direkte induzierte Anpassungsreaktion (Effekt der Endenergiepreisänderung auf THG-Emissionen)			
		S1	S2	S3	S4
Pkw- Benzin	-0,3	-0,35	-0,4	-0,02	
Pkw-Diesel	-0,3	-0,4	-0,3	-0,6	
E-Pkw	-0,3				-0,32
Lkw-Diesel	-0,15	-0,07	-0,29	-0,36	
E-Lkw	-0,15				-0,07

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Tabelle 17 zeigt die direkten Anpassungsreaktionen für das Jahr 2030. Diese liegen zwischen -0,02 und -0,4 und weichen somit von der eingänglichen Preiselastizität ab.¹⁰ Je nach Szenarioausgestaltung fallen diese somit höher oder niedriger aus als die eingängliche direkte Preiselastizität der Verkehrsnachfrage. Die Höhe hängt direkt mit der Ausgestaltung der Szenarien zusammen. Im Szenario S3 steigen zum Beispiel die Kosten für Benzin als auch Diesel durch die sukzessive Erhöhung der Energiesteuer. Die Angleichung der Besteuerungsgrundlage von Diesel auf das Niveau von Benzin führt dazu, dass der Dieselpreis deutlich stärker steigt als der Benzinpri. Vereinfacht gesagt gewinnen Benzin-Pkw an Attraktivität in der Nutzung und Zulassung und es gibt eine Verschiebung der Verkehrsnachfrage zwischen Diesel- und Benzin-Pkw. Diese

⁹ Eine erweiterte Diskussion zur Herleitung und dem eingeschränkten Interpretationsspielraum der induzierten Anpassungsreaktionen sind Hünecke et al (2024) zu entnehmen.

¹⁰ Vereinfachend ausgehend von einer gleichbleibenden Effizienz lässt sich die Veränderung der Verkehrsleistung auch direkt in THG-Emissionen übersetzen und vergleichen.

„Substitution“ in Kombination führt zu einer niedrigeren direkten Anpassungsreaktion bei Benzin-Pkw, als der Modellinput suggerieren würde. Gegenläufig sieht dem entsprechend die induzierte Anpassungsreaktion bei Diesel-Pkw aus.

Zu diesen „Substitutionseffekten“ gewinnen jedoch auch emissionsfreie Antriebe an Attraktivität und werden vermehrt gegenüber ihren fossil angetriebenen Pendanten nachgefragt. Dies verdeutlicht Szenario S2. Die Emissionsminderungswirkung der Energiepreisänderungen wird erhöht. Die entgegengesetzte Reaktion wird im Szenario S1 sichtbar.

Vergleicht man die Anpassungsreaktionen zwischen Lkw und Pkw, fällt auf, dass der Pkw-Verkehr deutlich stärker reagiert, unabhängig vom Szenario. Ferner reagiert der Lkw-Verkehr deutlich stärker auf Preisanpassungen von fossilen Kraftstoffen als auf Anpassungen der Strompreise.

3.3 Wechselwirkungen mit anderen Politikinstrumenten

Wie in Kapitel 3.1.1 und 3.1.2 erläutert, gibt es starke Wechselwirkungen zwischen Energiepreisänderungen und anderen Politikinstrumenten. Im Folgenden werden die Preisänderungen in den Szenarien in Hinblick auf die wichtigsten bestehenden Politikinstrumente eingeordnet.

3.3.1 Pkw Flottenzielwerte

Im Personenverkehr spielen insbesondere die Flottenzielwerte der Pkw eine entscheidende Rolle. Solange diese aktiv sind, werden finanzielle Anreize für emissionsarme Fahrzeuge von Seiten der Hersteller berücksichtigt. Da die Flottenzielwerte auf EU-Ebene beschlossen sind, ist es sinnvoll alle weiteren preislichen Lenkungswirkungen unter Einbeziehung der Flottenzielwerte zu untersuchen und zu bewerten. Obwohl die Flottenzielwerte die preislichen Lenkungswirkungen von Energiepreisen auf Neuzulassungen zum Teil überdecken d.h. trotz der angepassten Energiepreise sind die Flottenzielwerte weiterhin aktiv und bindend werden dennoch leichte Veränderungen in den Neuzulassungs- und den Bestandszahlen von Pkw sichtbar. So sind in S2 und S4 rund 100.000 bzw. 35.000 mehr BEVs im Bestand als in der Referenz (+1,2 % bzw. +0,4 %). So werden zur Erreichung der Flottenzielwerte vermehrt BEV anstelle von effizienteren Verbrennerfahrzeugen zugelassen. In den Szenarien S1 bis S4 werden die Pkw-Flottenzielwerte nicht übertroffen und die Neuzulassungsstruktur wird maßgeblich durch diese geprägt.

3.3.2 CO₂-abhängige Lkw-Maut

Im Güterverkehr hat die CO₂-abhängige Lkw Maut mit 200 Euro/tCO₂ eine starke preisliche Lenkungswirkungen auf die Neuzulassungen der Lkw. Die batterieelektrischen Lkw haben für die meisten Nutzungsprofile bereits in der Referenz einen Kostenvorteil gegenüber den übrigen Antriebstechnologien. Bereits in der Referenz ist die Wirkung der Lkw-Maut so stark, dass die Lkw-Neuzulassungen wesentlich durch die Ladeinfrastrukturrestriktionen und die Verfügbarkeit der Fahrzeuge begrenzt werden. Bei einem noch stärkeren Kostenvorteil ist mit einem zügigeren Aufbau der Ladeinfrastruktur und einer vermehrten Allokation von verfügbaren Fahrzeugen in Deutschland zu rechnen. So ist die Steigung der Neuzulassungsanteile von batterieelektrischen Fahrzeugen in den Szenarien S2 und S3 über einen schnelleren Ausbau der Ladeinfrastruktur und eine noch stärkere Konzentration der in der EU verfügbaren batterieelektrischen Fahrzeuge in Deutschland begründet.

3.4 Sensitivitätsanalyse: Einführung eines Malus

In den Ergebnissen der Szenarien S1 bis S4 wurde festgestellt, dass die preislichen Lenkungswirkungen insbesondere bei den Pkw einen schwachen Effekt auf die Elektrifizierung haben. Grund dafür ist, dass die in der Nutzungsphase anfallenden Energiekosten nur schwach in der Kaufentscheidung berücksichtigt werden (siehe Kapitel 2.2 und 3.2.1) und der geringe Kosteneffekt durch die Pkw-Flottenzielwerte überdeckt wird (siehe Kapitel 3.2.1 und 3.3). Im Folgenden wird daher ein Instrument untersucht, das explizit auf die Neuzulassungen von Pkw wirkt: Um den Markthochlauf der BEV im Pkw-Bereich anzukurbeln und dem Ziel von 15 Millionen zugelassenen BEV im Jahr 2030 näher zu kommen, wird ein Malus im Rahmen der Kfz-Steuer eingeführt. Ein Malus, der direkt beim Kauf des Fahrzeugs ansetzt, kann die Kaufentscheidung daher direkter beeinflussen als Instrumente, die auf die Energiekosten und damit die laufenden Kosten wirken.

Beim Malus wird die Kfz-Steuer für Pkw so geändert, dass im ersten Jahr nach der Neuzulassung eine höhere Kfz-Steuer in Abhängigkeit der CO₂-Emissionen pro km eines Fahrzeuges anfällt. Im Folgenden wird untersucht, inwiefern sich die Einführung eines Malus auf die Neuzulassungsstruktur und die THG-Emissionen im Personenverkehr auswirken. Dafür werden zwei Szenarien verglichen: Variante 1 und Variante 2 (im folgenden Szenario V1 und V2 genannt). Die Höhe des Malus wird immer ausgehend von einer Bemessungsgrenze ermittelt. Unterhalb der Bemessungsgrenze wird kein Malus fällig. Für jedes weitere Gramm CO₂ oberhalb der Bemessungsgrenze wird eine einmalige Zahlung in Höhe der definierten Malushöhe fällig. In V1 beträgt der Malus im Jahr 2024 15 Euro/gCO₂, in V2 wird der doppelte Betrag von V1, also 30 Euro/gCO₂ angesetzt, siehe Tabelle 18. In beiden Szenarien gilt die gleiche Bemessungsgrenze. Beginnend bei 95 gCO₂/km im Jahr 2024, sinkt diese bis 2030 auf null gCO₂/km ab. So werden ab dem Jahr 2030 nur noch emissionsfreie Fahrzeuge vom Malus befreit. Die Bemessungsgrenze sinkt langsam ab, um im Verlauf auch Plug-in-Hybride zu Effizienzsteigerungen durch höhere elektrische Reichweiten zu adressieren.

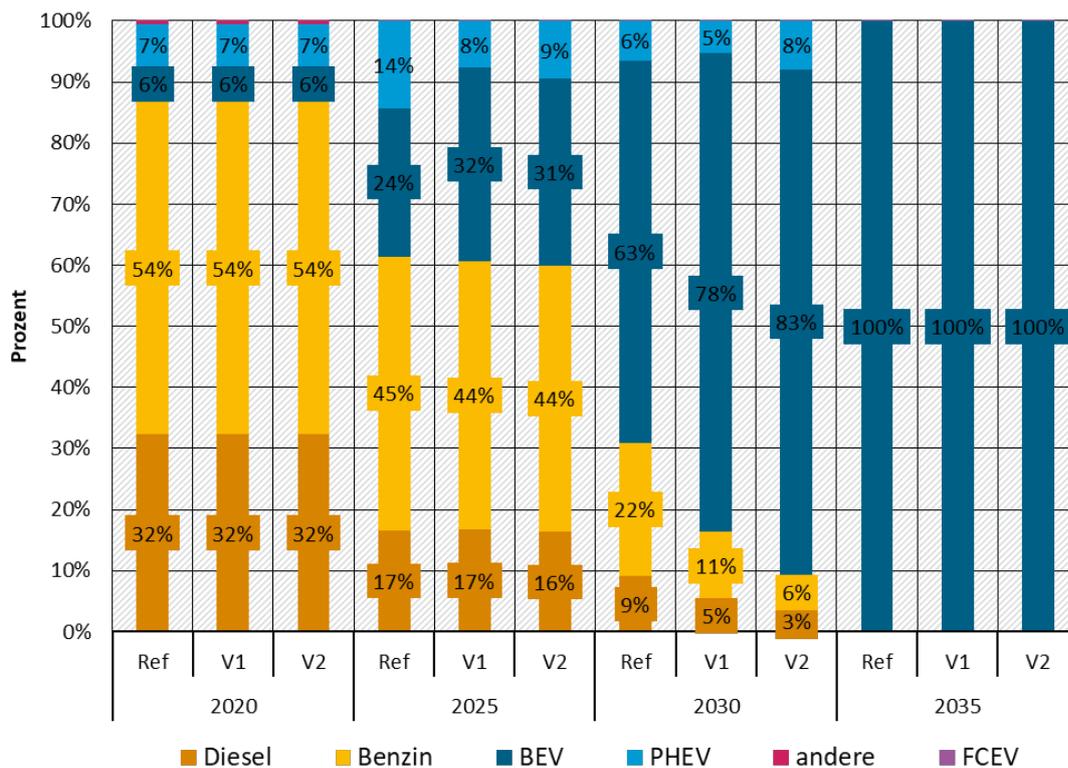
Weil zu erwarten ist, dass Zusatzkosten ab einer gewissen Höhe keine relevante Lenkungswirkung mehr leisten, wird die absolute Höhe der zusätzlichen CO₂-Komponente der Kfz-Steuer jeweils auf 50 % des Listenpreises des Fahrzeugs gedeckelt. Eine solche Deckelung besteht u.a. auch in Frankreich.

Tabelle 18: Ausgestaltung Malus in Szenarien V1 und V2

Jahr	Bemessungsgrenze in gCO ₂ /km	Variante 1 (V1): Malus in Euro/gCO ₂ bei Überschreitung der Bemessungsgrenze	Variante 2 (V2): Malus in Euro/gCO ₂ bei Überschreitung der Bemessungsgrenze
2024	95	15	30
2025	80	20	40
2026	65	30	60
2027	50	40	80
2028	35	50	100
2029	20	55	110
Ab 2030	0	60	120

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Die Einführung des Malus wirkt ausschließlich auf den Personenverkehr. Durch die höhere Kfz-Steuer im ersten Jahr steigen die in der TCO berücksichtigten Anschaffungskosten. Ein Blick auf die Neuzulassungsstruktur in Abbildung 14 zeigt, wie sich der Malus auf das Kaufverhalten auswirkt. In beiden Szenarien werden die Flottenzielwerte durch den starken Kosteneffekt übertroffen. In Szenario V1 wirkt der Malus durch die schwächere Ausgestaltung etwas verzögert gegenüber Szenario V2, erzielt aber im Jahr 2030 mit 78 % BEVs einen ähnlichen Anteil wie Variante 2 mit 83 %. Obwohl sich die Neuzulassungsanteile der Varianten mit der Zeit annähern, bewirkt die schnellere Elektrifizierung in V2, dass im Jahr 2030 mehr batterieelektrische Fahrzeuge im Bestand sind, was sich wiederum vorteilhaft auf die Treibhausgasmin- derung in Hinblick auf die Klimaschutzziele 2030 auswirkt.

Abbildung 14: Neuzulassungsanteile Pkw in Szenarien V1 und V2

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Tabelle 19 zeigt den Pkw Bestand aufgeschlüsselt nach Antrieben im Jahr 2030. Während in V1 im Jahr 2030 rund 2,6 Mio. BEVs mehr im Bestand sind als in der Referenz, sind es in V2 rund 3,9 Mio. Fahrzeuge mehr.

Tabelle 19: Pkw Bestand im Jahr 2030 in Szenarien V1 und V2 (in Mio. Fahrzeugen)

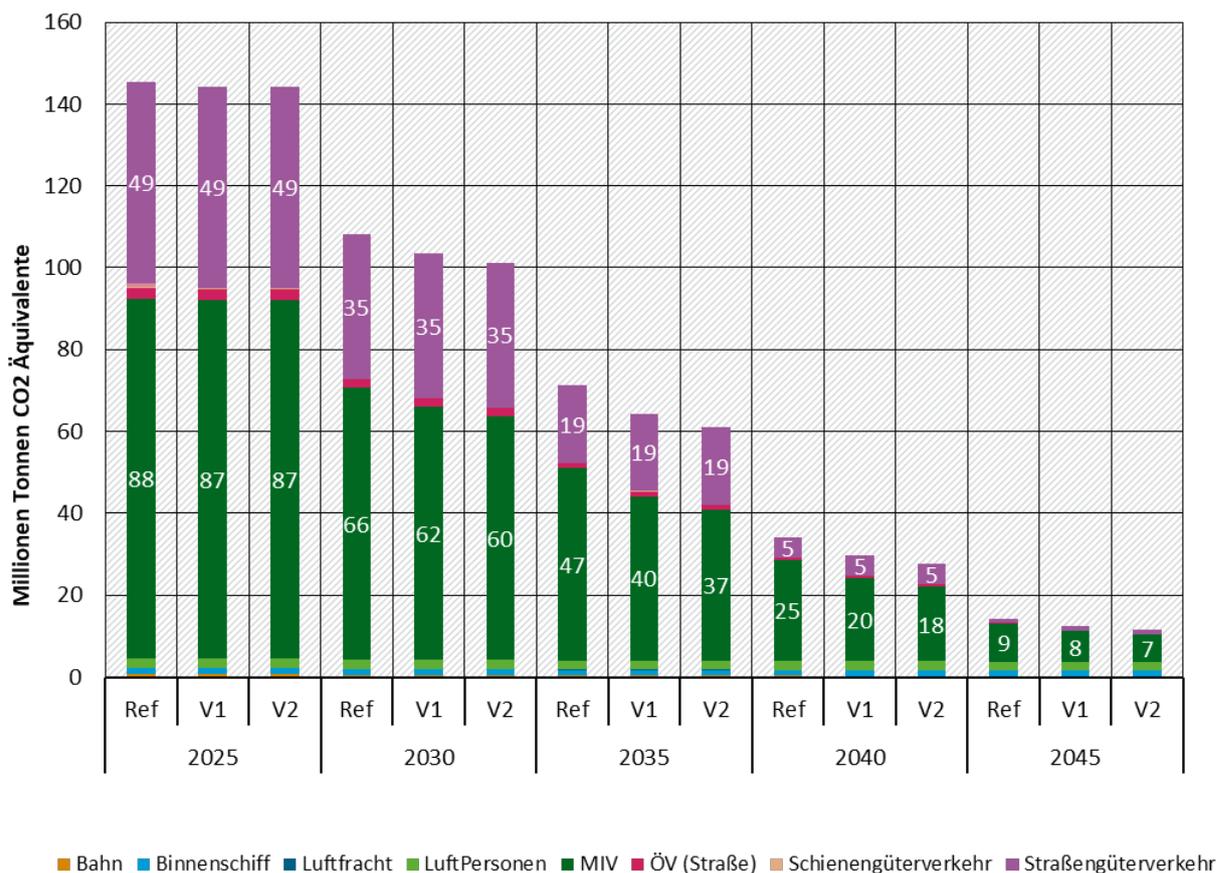
Szenario	Diesel	Benzin	BEV	PHEV	Andere
Referenz	9,95	27,60	8,20 ¹¹	3,74	0,17
V1	9,52	26,16	10,84	2,96	0,17
V2	9,14	24,93	12,07	3,35	0,17

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Die daraus resultierenden THG-Minderungen belaufen sich in V1 auf -4 % und in V2 auf -6 % im Jahr 2030 gegenüber der Referenz. Die absoluten Zahlen sind Tabelle 20 zu entnehmen. Wie in Abbildung 15 zu erkennen, geht die Minderung in den Varianten allein auf die schnellere Elektrifizierung im MIV zurück.

¹¹ Im Projektionsbericht 2024 werden im Jahr 2030 bereits 10,7 Mio. BEV erreicht. Dies ist unter anderem durch eine Anpassung der Annahmen zum Zielerreichungspfad der EU-Pkw-Flottenzielwerte begründet (Harthan et al. 2024).

Abbildung 15: THG-Emissionen in Szenarien V1 und V2



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

In Tabelle 20 sind die gesamten Emissionen des Verkehrssektors der Szenarien V1 und V2 sowie S1 und S2 dargestellt. Sowohl in Szenario V1 als auch V2 kommt es zu einer Emissionsminderung von vier Prozent und sechs Prozent im Jahr 2030. Der Vergleich zu Szenarien S2 und S3 im Jahr 2030 zeigt, dass eine Anpassung der Energiesteuer ab 2024 (Szenario S3) in etwa die Emissionsminderung erreicht, wie ein sehr stark ausgestalteter Malus (Variante V2). Hingegen weist das Szenario mit dem hohen CO₂-Preis (Szenario S2) eine ähnliche Minderung auf wie ein etwas schwächer ausgestalteter Malus in Variante V1.

Aus fiskalischer Sicht ergeben sich im V1-Szenario für den Zeitraum von 2024-2035 Mehreinnahmen (geringere Energiesteuer + Einnahmen aus Malus) von rund 110 Mrd. Euro₂₀₂₂ und damit in vergleichbarer Höhe wie im S2 Szenario mit Mehreinnahmen (erhöhte CO₂-Steuer) von rund 103 Mrd. Euro₂₀₂₂ gegenüber der Referenz. Die weniger ambitionierte Ausgestaltung des Malus führt im gleichen Zeitraum zu Mehreinnahmen des Staates (geringere Energiesteuer + Einnahmen aus Malus) von rund 80 Mrd. Euro₂₀₂₂, welche vergleichbar mit den Mehreinnahmen des Staates (erhöhte Energiesteuer + reduzierte Kfz-Steuer für Diesel-Pkw) im S3 Szenario von 75 Mrd. Euro₂₀₂₂ sind.

Im Zeithorizont bis 2045 werden aufgrund der starken Elektrifizierung in den Varianten 1 und 2 die niedrigsten Emissionen im Vergleich zu den Szenarien S1 bis S4 erreicht mit 11,7 bzw. 12,6 tCO₂-Äq.

Tabelle 20: THG-Emissionen nach Jahren in Szenarien V1, V2 sowie S2 und S3 (in tCO₂-Äq)

Szenario	2025	2030	2035	2040	2045
Referenz	144,3	107,6	71,6	34,9	14,6
V1	144,2	103,5	64,4	29,7	12,4
V2	144,2	101,3	60,9	27,6	11,5
S2	144,3	100,7	64,3	31,8	13,7
S3	141,7	101,2	63,7	32,0	14,0

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

4 Fazit und Handlungsempfehlungen

Um die Lenkungswirkung verschiedener Energiepreisänderungen zu untersuchen, wurden vier Szenarien definiert und analysiert. Während die ersten beiden Szenarien die Wirkung eines veränderten CO₂-Preispfades untersuchen, wird im dritten Szenario eine Energiesteueranpassung mit Inflationsausgleich auf fossile Kraftstoffe betrachtet. Das vierte Szenario untersucht die Wirkung einer Absenkung der Stromsteuer auf das europäische Mindestmaß und die Einführung eines Inflationsausgleichs. Die folgende Tabelle 21 fasst die Ergebnisse der projizierten THG-Emissionen in den verschiedenen Szenarien zusammen.

Tabelle 21: THG-Emissionen nach Jahren, Vergleich der Szenarien (in Mio. tCO₂-Äq)

Szenario	Kurzbeschreibung	2025	2030	2035	2040	2045
Referenz		144,3	107,6	71,6	34,9	14,6
S1	niedriger CO ₂ -Preis	144,3	110,4	74,7	35,5	14,6
S2	hoher CO ₂ -Preis	144,3	100,7	64,3	31,8	13,7
S3	ange. Energiesteuer	141,7	101,2	63,7	32,0	14,0
S4	minimale Stromsteuer	144,1	107,3	70,8	34,0	14,3
V1	Malus, Variante 1	144,2	103,5	64,4	29,7	12,4
V2	Malus, Variante 2	144,2	101,3	60,9	27,6	11,5

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Während das Szenario S1 (niedriger CO₂-Preis) kurzfristig zu mehr Emissionen führt, erreicht es langfristig ein ähnliches Emissionsniveau wie die Referenz. Die Anpassung der Stromsteuer hat von allen Szenarien die kleinste Minderungswirkung von rund 0,3 Mio. tCO₂-Äq im Jahr 2030.

Die Anpassung der Stromsteuer wirkt sich nur geringfügig auf den Bestand, die Verlagerung und somit auch die Emissionen aus. Dagegen zeigen die Szenarien S2 und S3 hier deutliche Veränderungen gegenüber der Referenz. Sowohl die Einführung eines hohen CO₂-Preises (S2) als auch die Anpassung der Energiesteuer (S3) bewirken eine schnellere Elektrifizierung, da die Betriebskosten für konventionelle Antriebe steigen und die ökonomischen Anreize für Nullemissionsfahrzeuge steigen.

Die Anpassung der Energiebesteuerung orientiert sich am Vorschlag der EU-Kommission zur Revision der Energy Tax Directive und baut den aus Sicht des Klimaschutzes kontraproduktiv vergünstigten Steuersatz für Dieselmotoren ab. Zusätzlich wird für die nominal notierten Steuersätzen ein Inflationsausgleich eingeführt, um die Lenkungswirkung im Zeitverlauf konstant zu halten. Die Dominanz des Dieselantriebs im Straßengüterverkehr führt dazu, dass insbesondere der Güterverkehr von diesem Instrument finanziell betroffen ist.

Da die Pkw-Flottenzielwerte in allen Szenarien bereits zu starken Anreizen für die Kaufentscheidung batterieelektrischer Antriebe führen, ist der Effekt auf die Elektrifizierung bei Pkw gedämpft. Bei den Lkw ist die Elektrifizierung maßgeblich durch den Ausbau der Ladeinfrastruktur begrenzt, da bereits in der Referenz durch die CO₂-Komponente der Lkw-Maut ein hoher ökonomischer Anreiz für die Elektrifizierung besteht. Sowohl durch den hohen CO₂-Preis als auch durch die Anpassung der Energiebesteuerung findet darüber hinaus im Personenverkehr eine starke Verlagerung auf andere Verkehrsträger statt, insbesondere auf die Schiene.

Durch den hohen CO₂-Preis werden die höchsten Emissionsminderungen von -6,9 Mio. tCO₂-Äq (kumuliert bis 2030 rund 30,4 Mio. tCO₂-Äq) im Jahr 2030 gegenüber der Referenz erreicht, während durch die Energiesteueranpassung (S3) -6,4 Mio. tCO₂-Äq (kumuliert bis 2030 rund 32,5 Mio. tCO₂-Äq) Minderungen erzielt werden.

Neben den Energiepreisszenarien wurden zwei Sensitivitäten gerechnet, welche nicht (unmittelbar) über Veränderungen von staatlich bedingten Energiepreisbestandteilen wirken und über ein anderes ökonomisches Instrument auf einen beschleunigten Hochlauf der Elektromobilität von Pkw abzielen. In beiden Szenarien (V1, V2) wurde eine Maluszahlung für CO₂-emittierende Pkw bei Neuzulassung mit unterschiedlicher Ausgestaltung eingeführt. Diese wird über eine einmalige Erhöhung der Kfz-Steuer im ersten Jahr nach Erstzulassung realisiert, deren Höhe abhängig von den CO₂-Emissionen des Fahrzeugs ist. In beiden Szenarien wirkt der Malus stark auf die Neuzulassungsstruktur der Pkw und führt zu einer starken Beschleunigung der Elektrifizierung der Flotte. Allerdings trägt allein der motorisierte Individualverkehr die zusätzlichen Kosten. Mithilfe des Malus können so bis 2030 rund 4,1 Mio. tCO₂-Äq (bei einer weniger ambitionierten Ausgestaltung) und 6,3 Mio. tCO₂-Äq bei einer höheren Ausgestaltung im Jahr 2030 eingespart werden. Diese Minderung wird durch die Unterschiede in der Antriebsverteilung der Pkw realisiert, während die Anpassung der Energiekosten in der Nutzungsphase des Fahrzeugs, bspw. durch eine Anpassung der Energiebesteuerung oder des CO₂-Preises, vermehrt auf Verlagerung und Vermeidung von Verkehren abzielen.

Insbesondere die Szenarien erhöhter CO₂-Preis und Anpassung der Energiebesteuerung zeigen die Lenkungswirkung staatlich bestimmter Energiepreisbestandteile im Verkehrssektor. Gleichzeitig werden aber auch Limitierungen in der Lenkungswirkung deutlich. Insbesondere die Pkw-Neuzulassungen und umso mehr der Pkw-Bestand reagieren allenfalls träge auf reine Anpassungen der Energiekosten. Hier zeigen die Sensitivitätsrechnungen deutlich, dass ein Instrument wie der Malus, welcher gezielt auf den Pkw-Kauf abzielt, deutlich mehr Lenkungswirkung bei der Wahl des Fahrzeuges entfaltet. Im Straßengüterverkehr begrenzt vor allem die sich noch im Aufbau befindende Ladeinfrastruktur den Umstieg auf emissionsärmere Fahrzeuge. Bereits in der Referenz gibt es starke finanzielle Anreize für die Nutzung von Nullemissionsfahrzeugen im Straßengüterverkehr, die in den untersuchten Szenarien noch deutlicher werden.

Die Ergebnisse verdeutlichen jedoch auch, dass in keinem der skizzierten Szenarien selbst bei Verschärfung der marktbasieren oder staatlich induzierten Preissignale auf fossile Kraftstoffe die Instrumentenausgestaltung ausreicht, um die nationalen sektorspezifischen Klimaschutzziele bis 2030 oder die Klimaneutralität 2045 zu realisieren. Die ergänzenden Analysen zeigen, dass eine schnellere Elektrifizierung des Pkw-Bestandes mittels eines beim Pkw-Kauf wirkenden Malus deutlich beschleunigt werden kann. Damit wird die Antriebswahl stärker beeinflusst als durch direkte Erhöhung der Preise für fossile Kraftstoffe. Die Erhöhung des CO₂-Preises oder die Anpassung der Energiebesteuerung wirken hingegen mittelfristig vor allem auf die Verkehrsverlagerung und -vermeidung, insbesondere im Personenverkehr. Die (moderate) Anpassung der Stromsteuer hat von allen Szenarien die kleinste Minderungswirkung.

Die Variation von staatlich bestimmten Energiepreisbestandteilen kann einen relevanten Beitrag bei der Emissionsreduktion im Verkehrssektor leisten. Zusätzlich kann eine Kombination an Instrumenten mit verschiedenen Wirkungsmechanismen und unterschiedlichem Fokus helfen die Emissionen schneller und deutlicher zu senken und somit die Klimaschutzziele im Verkehrssektor zu erreichen und kann helfen die Bedürfnisse verschiedenster Akteure, wie beispielweise von der Transformation finanziell besonders betroffene Haushalte, gezielt zu unterstützen. Zielerreichungsszenarien wie bspw. Kreye et al. (2024) oder Prognos et al. (2020) zeigen, dass eine erfolgreiche Zielerreichung im Verkehrssektor mithilfe eines ambitionierten Instrumentenmixes möglich ist. Dazu ist jedoch umgehend politisches Handeln erforderlich.

5 Quellenverzeichnis

- Allcot, H.; Wozny, N. (2012): Gasoline price, fuel economy and the energy paradox. National Bureau of Economic Research (NBER) Working Paper 18583. Online verfügbar unter https://www.nber.org/system/files/working_papers/w18583/w18583.pdf, zuletzt geprüft am 20.06.2024.
- Bäumer, M.; Hautzinger, H.; Pfeiffer, M.; Stock, W.; Lenz, B.; Kuhnimhof, T.G.; Köhler, K. (2017): Fahrleistungserhebung 2014 - Inlandsfahrleistung und Unfallrisiko. Bremen (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Verkehrstechnik). Online verfügbar unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/opus45-bast/frontdoor/deliver/index/docId/1775/file/BAST_V_291_barrierefreies_Internet_PDF.pdf, zuletzt geprüft am 20.06.2024.
- Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) (Hg.) (2015): Ergebnisse Fahrleistungserhebung 2014. BASt. Online verfügbar unter <https://www.bast.de/DE/Verkehrssicherheit/Fachthemen/U2-fahrleistung-2014/u2-fahrleistung-2014.html> zuletzt geprüft am 20.06.2024.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (Hg.) (2010): Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010 (KiD 2010). Ergebnisse der bundesweiten Verkehrsbefragung. BMVI. Online verfügbar unter <http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/kraftfahrzeugverkehr-in-deutschland-2010-kid-2010.html>, zuletzt geprüft am 20.06.2024.
- Bundesregierung (2024): Ein Plan fürs Klima. Online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/tipps-fuer-verbraucher/klimaschutzgesetz-2197410> zuletzt geprüft am 20.06.2024.
- BVU Beratergruppe; Intraplan Consult GmbH; IVV GmbH & Co. KG; Planco Consulting (Planco) (2014): Verkehrsverflechtungsprognose 2030. Abschlussbericht - Los 3, Online verfügbar unter <https://daten.clearingstelle-verkehr.de/276/1/verkehrsverflechtungsprognose-2030-schlussbericht-los-3.pdf> zuletzt geprüft am 20.06.2024.
- Ecke, L.; Chlond, B.; Magdolen, M.; Vallée, J.; Vortisch, P. (2021): Deutsches Mobilitätspanel (MOP) – Wissenschaftliche Begleitung und Auswertungen Bericht 2020/2021: Alltagsmobilität und Fahrleistung. Hg. v. Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Karlsruhe. Online verfügbar unter https://mobilitaetspanel.ifv.kit.edu/downloads/Bericht_MOP_20_21.pdf. zuletzt geprüft am 20.06.2024.
- EEA (2023): CO₂ emissions from new passenger cars registered in EU27, Iceland (from 2018) and Norway (from 2019) – Regulation (EU) 2019/631. Online verfügbar unter <https://co2cars.apps.eea.europa.eu> zuletzt geprüft am 21.03.2024.
- European Commission (EC) (2021): Proposal for a Council Directive restructuring the Union framework for the taxation of energy products and electricity (recast). COM (2021) 563 final. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52021PC0563> zuletzt geprüft am 21.03.2024
- Fan, Q.; Rubin, J. (2010): Two-Stage Hedonic Price Model for Light-Duty Vehicles. In: Transportation Research Record 2157 (1), S. 119–128. DOI: 10.3141/2157-15. zuletzt geprüft am 21.03.2024.
- Göckeler, K.; Hacker, F.; Ziegler, L.; Heinzlmann, J.; Lesemann, L.; Bernecker, T. (2022): Anforderungen der Logistikbranche an einen Umstieg auf klimaschonende Fahrzeugtechnologien - Ergebnisbericht einer standardisierten Befragung. Zweiter Teilbericht des Forschungs- und Dialogvorhabens „StratES: Strategie für die Elektrifizierung des Straßengüterverkehr“. Öko-Institut; Hochschule Heilbronn. Online verfügbar unter https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/StratES-Teilbericht_2-Befragung_Logistikbranche.pdf, zuletzt geprüft am 21.03.2024.
- Göckeler, K.; Steinbach, I.; Görz, W.; Hacker, F.; Blanck, R.; Mottschall, M. (2023): StratES – Szenarien für die Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs. Studie auf Basis von Markthochlaufmodellierungen. Dritter Teilbericht des Forschungs- und Dialogvorhabens StratES. Hg. v. Öko-Institut. Öko-Institut. Online verfügbar

unter <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/StratES-Szenarien-Elektrifizierung-Strassengueterverkehr.pdf>, zuletzt geprüft am 27.09.2023.

Günthel, D.; Böttger, C.; Wiener, T.; Rössler, R. (2018): Gutachten zur Bestimmung der Elastizität der Nachfrage der Eisenbahnverkehrsunternehmen. Hg. v. KCW GmbH, Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Eisenbahn/Unternehmen_Institutionen/VeroeffentlichungenGutachten/GAElatizitaeten2018/GutachtenElastizitaet2018.pdf?__blob=publicationFile&v=2 zuletzt geprüft am 21.03.2024.

Hacker, F.; von Waldenfels, R.; Mottschall, M. (2015): Wirtschaftlichkeit von Elektromobilität in gewerblichen Anwendungen. Betrachtung von Gesamtnutzungskosten, ökonomischen Potenzialen und möglicher CO₂-Minderung. Im Auftrag der Begleitforschung zum BMWi Förderschwerpunkt IKT für Elektromobilität II: Smart Car – Smart Grid – Smart Traffic. Öko-Institut. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Gesamtbericht-Wirtschaftlichkeit-von-Elektromobilitaet.pdf> zuletzt geprüft am 21.03.2024.

Harthan, R.; Förster, H.; Borkowski, K.; Böttcher, H.; Braungardt, S.; Bürger, V.; Emele, L.; Görz, W.K.; Hennenberg, K.; Jansen, L.L.; Jörß, W.; Kasten, P.; Loreck, C.; Ludig, S.; Matthes, F.C.; Mendelevitch, R.; Moosmann, L.; Nissen, C.; Repenning, J.; Scheffler, M.; Steinbach, I.; Bei der Wieden, M.; Wiegmann, K.; Brugger, H.; Fleiter, T.; Mandel, T.; Rehfeldt, M.; Rohde, C.; Yu, S.; Steinbach, J.; Deurer, J.; Fuß, R.; Rock, R.; Osterburg, B.; Rüter, S.; Adam, S.; Dunger, K.; Rösemann, C.; Stümer, W.; Tiemeyer, B.; Vos, C. (2023): Projektionsbericht 2023 für Deutschland. Gemäß Artikel 18 der Verordnung (EU) 2018/1999 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 über das Governance-System für die Energieunion und für den Klimaschutz, zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 663/2009 und (EG) Nr. 715/2009. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Öko-Institut; Fraunhofer ISI; IREES; Thünen-Institut. Dessau-Roßlau (Climate Change, 39/2023). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/projektionsbericht-2023-fuer-deutschland>, zuletzt geprüft am 31.01.2024.

Harthan, R.; Förster, H.; Braungardt, S.; Bürger, V.; Emele, L.; Görz, W.K.; Jansen, L.L.; Jörß, W.; Kasten, P.; Loreck, C.; Ludig, S.; Scheffler, M.; Steinbach, I.; Bei der Wieden, M.; Brugger, H.; Fleiter, T.; Mandel, T.; Rehfeldt, M.; Deurer, J.; Steinbach, J.; Osterburg, B.; Rock, J. (2024): Treibhausgas-Projektionen für Deutschland. Instrumente. Umweltbundesamt (Hrsg.) Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/projektionsbericht_2024_instrumentenpapier.pdf zuletzt geprüft am 31.07.2024.

Hautzinger, H.; Mayer, K.; Helms, M.; Kern, C.; Wiesenhütter, M.; Haag, G.; Binder, J. (2004): Analyse von Änderungen des Mobilitätsverhaltens - insbesondere der Pkw-Fahrleistung - als Reaktion auf geänderte Kraftstoffpreise. Schlussbericht zum FP 96.0756/2002 des BMVBW. Hg. v. Institut für angewandte Verkehrs- und Tourismusforschung (IVT). Online verfügbar unter <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/164566/>, zuletzt geprüft am 21.03.2024.

Hünecke, K.; Schumacher, K.; Appenfeller, D.; Braungardt, S.; Bei der Wieden, M.; Cludius, J.; Graichen, J.; Graichen, V.; Hermann, H.; Keimeyer, F.; Kreye, K. Mendelevitch, R.; Steinbach, I.; Zerkawy, F.; Meemken, S.; Schrems, I.; Lutz, C.; Becker, L.; Klinski, S. (noch unveröffentlicht): Der Beitrag ökonomischer Instrumente zur Erreichung der Klimaschutzziele: Die Rolle der staatlich bestimmten Energiepreisbestandteile im Instrumenten-Mix. Abschlussbericht. Umweltbundesamt (Hrsg.)

Peter, M.; Lückge, H.; Killer, M.; Maibach M. (2016): Auswirkungen eines EHS-Linking für den Bereich Luftfahrt – Aktualisierung für die Schweiz. Schlussbericht. Zürich. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU). Online verfügbar unter https://www.infras.ch/media/filer_public/d7/50/d75057e9-6800-4925-9857-b8e531a3e318/infras_28201629_auswirkung_eines_ehs-linkings_fur_den_bereich_luftfahrt_-_aktualisierung_fur_die_schweiz_im_auftrag_des_bafu_zurich.pdf zuletzt geprüft am 21.03.2024.

Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (ifeu) (Hg.) (2023): TREMOD. Transport Emission Model. Online verfügbar unter <https://www.ifeu.de/en/methods-tools/models/tremod/>, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

Intraplan, IVV, TRIMODE, Planco (2017): Klimaschutz-Szenario Baden-Württemberg 2030. Schlussbericht. Hg. v. Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg (MVI BaWü). München, Aachen, Freiburg, Essen. Online verfügbar unter https://vm.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-mvi/intern/Dateien/PDF/Klimaschutzszenario_Schlussbericht_P2_Teil_1.pdf zuletzt geprüft am 21.03.2024.

de Jong, G; Schroten, A.; van Essen, H.; Otten, M.; Bucci, P. (2010): Price sensitivity of European road freight transport – towards a better understanding of existing results. A report for Transport & Environment. Online verfügbar unter https://ce.nl/wp-content/uploads/2021/03/4053_defreportASc.pdf zuletzt geprüft am 21.03.2024.

Kreye, K.; Kasten, P.; Appenfeller, D.; Steinbach, I.; Zimmermann, M.; Greinus, A. (2024): Verkehrssektor auf Kurs bringen: Szenarien zur Treibhausgasneutralität 2045. Öko Institut und Infrac im Auftrag des Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/59_2024_texte_verkehrssektor_auf_kurs_bringen_0.pdf zuletzt geprüft am 21.03.2024.

Litman, T. (2004): Transit Price Elasticities and Cross-Elasticities. In: Journal of Public Transportation 7 (2), S. 37–58. DOI: 10.5038/2375-0901.7.2.3. zuletzt geprüft am 21.03.2024.

Mock, P. (2010): Entwicklung eines Szenariomodells zur Simulation der zukünftigen Marktanteile und CO₂-Emissionen von Kraftfahrzeugen (VECTOR21). Dissertation. Universität Stuttgart. Online verfügbar unter <https://elib.uni-stuttgart.de/handle/11682/6777> zuletzt geprüft am 21.03.2024.

Nobis, C.; Kuhnimhof, T. (2018): Mobilität in Deutschland – MiD. Ergebnisbericht. FE-Nr. 70.904/15. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). infas; DLR; IVT; infas 360. Bonn, Berlin. Online verfügbar unter http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/MiD2017_Ergebnisbericht.pdf, zuletzt geprüft am 21.03.2024.

Nationale Plattform Zukunft der Mobilität (NPM) (2021): Wege für mehr Klimaschutz im Verkehr. Arbeitsgruppe 1 Klimaschutz im Verkehr. Online verfügbar unter https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2021/07/NPM_AG1_Wege-fuer-mehr-Klimaschutz.pdf, zuletzt geprüft am 21.03.2024.

Öko-Institut; Fraunhofer ISI; IREES; Thünen-Institut (2023): Treibhausgasprojektionen 2023 für Deutschland. Instrumente im MMS und MWMS. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/372/dokumente/projektionsbericht2023_instrumente_final.pdf, zuletzt geprüft am 21.03.2024.

Prognos; Öko-Institut; Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie (Wuppertal Institut) (2020): Klimaneutrales Deutschland. Zusammenfassung im Auftrag von Agora Energiewende, Agora Verkehrswende und Stiftung Klimaneutralität. Berlin. Online verfügbar unter https://static.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2020/2020_10_KNDE/A-EW_192_KNDE_Zusammenfassung_DE_WEB.pdf, zuletzt geprüft am 21.03.2024.

Schade, W.; Perez, E.; Berthold D.; Wagner, U.; Krail, M.; Waßmuth, V. (2018): Gestaltung des MKS Referenzszenarios für die Periode 2021 bis 2035 (REF-2020). Arbeitspapier im Auftrag des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr. Karlsruhe. Online verfügbar unter https://m-five.de/wp-content/uploads/M_Five_ISI_PTV_MKS_Referenzszenario_REF_2020_220308_rev221017.pdf zuletzt geprüft am 21.03.2024.

Litman, T. (2023): Transit Price Elasticities and Cross Elasticities. 12 April 2023. Victoria Transport Policy Institute (VTPI) (Hg.) Online verfügbar unter <https://www.vtpi.org/tranelas.pdf>, zuletzt geprüft am 21.03.2024.

Zimmer, W.; Buchert, M.; Degreif, S.; Hacker, F.; Harthan, R.; Hermann, H.; Jenseit, W.; Kasten, P.; Loreck, C.; Götz, K.; Sunderer, G., Birzle-Harder, B.; Deffner, J. (2011): OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen - Integrierte Betrachtung von Fahrzeugnutzung und Energiewirtschaft. Integrierte Betrachtung von Fahrzeugnutzung und Energiewirtschaft. Hg. v. Öko-Institut. Öko-Institut; ISOE. Schlussbericht im Rahmen der Förderung von Forschung und Entwicklung im Bereich der Elektromobilität des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Online verfügbar unter https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/publications/abschlussbericht-optum_1.pdf zuletzt geprüft am 21.03.2024.