

Studie

Szenarien zur Berechnung der Kosten für die Verkehrswende in Deutschland

Studie im Auftrag von Agora Verkehrswende



© iStock - olo_1

Studie

Szenarien zur Berechnung der Kosten für die Verkehrswende in Deutschland

Studie im Auftrag von Agora Verkehrswende

Projektnummer B101251

Von

Alex Auf der Maur
Andreas Brutsche
Marie-Luise Zwicker
Tim Trachsel

Im Auftrag von

Agora Verkehrswende

Abschlussdatum

Mai, 2024

Das Unternehmen im Überblick

Prognos – wir geben Orientierung.

Die Prognos AG ist eines der ältesten Wirtschaftsforschungsunternehmen Europas. An der Universität Basel gegründet, forschen Prognos-Expertinnen und -Experten seit 1959 für verschiedenste Auftraggeber aus dem öffentlichen und privaten Sektor – politisch unabhängig, wissenschaftlich fundiert. Die bewährten Modelle der Prognos AG liefern die Basis für belastbare Prognosen und Szenarien. Mit über 200 Expertinnen und Experten ist das Unternehmen an zehn Standorten vertreten: Basel, Berlin, Bremen, Brüssel, Düsseldorf, Freiburg, Hamburg, München, Stuttgart und Wien. In Wien sitzt die Prognos Europe GmbH, unsere Tochtergesellschaft in Österreich. Die Projektteams arbeiten interdisziplinär, verbinden Theorie und Praxis, Wissenschaft, Wirtschaft und Politik.

Geschäftsführer

Christian Böllhoff

Präsident des Verwaltungsrates

Dr. Jan Giller

Handelsregisternummer

CH-270.3.003.262-6

Mehrwertsteuernummer/UID

CH-107.308.511

Rechtsform

Aktiengesellschaft nach schweizerischem Recht; Sitz der Gesellschaft: Basel-Stadt
Handelsregisternummer
CH-270.3.003.262-6

Gründungsjahr

1959

Arbeitsprachen

Deutsch, Englisch, Französisch

Hauptsitz der Prognos AG
in der Schweiz

Prognos AG

St. Alban-Vorstadt 24
4052 Basel

Weitere Standorte der
Prognos AG in Deutschland

Prognos AG

Goethestr. 85
10623 Berlin

Prognos AG

Domshof 21
28195 Bremen

Prognos AG

Werdener Straße 4
40227 Düsseldorf

Prognos AG

Heinrich-von-Stephan-Str. 17
79100 Freiburg

Prognos AG

Hermannstraße 13
(c/o WeWork)
20095 Hamburg

Prognos AG

Nymphenburger Str. 14
80335 München

Prognos AG

Eberhardstr. 12
70173 Stuttgart

Standort der Prognos AG
in Belgien

Prognos AG

Résidence Palace, Block C
Rue de la Loi 155
1040 Brüssel

Tochtergesellschaft
in Österreich

Prognos Europe GmbH

Walcherstraße 11
1020 Wien

info@prognos.com | www.prognos.com | www.twitter.com/prognos_ag

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	VI
Abbildungsverzeichnis	VIII
Abkürzungsverzeichnis	X
Zusammenfassung	XI
1 Einleitung	1
2 Verkehrsszenarien	3
2.1 Konzeption der Szenarien	3
2.2 Entwicklung der Verkehrsnachfrage	5
2.2.1 Personenverkehr	5
2.2.2 Güterverkehr	7
2.3 Entwicklung der Antriebstechnologien	9
2.3.1 Pkw	9
2.3.2 Straßengüterverkehr und Busse	12
2.4 Energieverbrauch	14
2.5 Emissionen	16
3 Herleitung der Ausgaben und Kosten	18
3.1 Methodische und begriffliche Grundlagen	18
3.2 Verkehrsinfrastruktur	21
3.2.1 Schieneninfrastruktur	21
3.2.2 Straßeninfrastruktur	25
3.2.3 Ergebnisse: Ausgaben und Kosten der Verkehrsinfrastruktur	27
3.3 Ladeinfrastruktur	29
3.3.1 Pkw	30
3.3.2 Straßengüterverkehr und Busse	33
3.3.3 Ergebnisse: Ausgaben und Kosten der Ladeinfrastruktur	34

3.4	Wasserstofftankstellen	36
3.5	Straßen- und Schienenfahrzeuge	37
3.5.1	Pkw	37
3.5.2	Straßengüterverkehr und Busse	38
3.5.3	Schienenfahrzeuge	38
3.5.4	Ergebnisse: Ausgaben und Kosten der Straßen- und Schienenfahrzeuge	40
3.6	Personalkosten	42
3.6.1	Busse, Stadtbahnen und Schienenpersonennahverkehr	43
3.6.2	Schienenpersonenfernverkehr	44
3.6.3	Straßengüterverkehr	45
3.6.4	Schienengüterverkehr	46
3.6.5	Ergebnisse: Kosten für Personal	47
3.7	Wartungskosten	48
3.8	Energiekosten	50
3.9	Klimaschadenskosten (externe Kosten)	52
4	Gesamtergebnisse und Vergleich der Szenarien	54
4.1	Ausgaben	54
4.2	Kosten	58
4.3	Vergleich der Szenarien	59
5	Fazit	63
	Quellenverzeichnis	X
	Anhang – Modellbeschreibung TEMPO	XIV
	Impressum	XIX

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Bezeichnung der Szenarien in den unterschiedlichen Berichten	5
Tabelle 2:	Betrachtete Kostenkategorien	18
Tabelle 3:	Angenommene Lebensdauer zur Berechnung der Kosten	19
Tabelle 4:	Zuordnung der Verkehrsmittel bei den Ausgaben und Kosten	20
Tabelle 5:	Geplante Generalsanierungen von Bund und Deutscher Bahn bis 2030	22
Tabelle 6:	Bundeshaushalt – Ausgaben in Mrd. Euro	22
Tabelle 7:	Bundeshaushalt – Verpflichtungsermächtigungen in Mrd. Euro	22
Tabelle 8:	Investitionen DB Netze Fahrweg in Mio. Euro	23
Tabelle 9:	Ausgaben für Bundesfernstraßen (BAB und Bundesstraßen)	25
Tabelle 10:	Ausgaben für kommunale Straßen	25
Tabelle 11:	Ausgaben für Landes- und Kreisstraßen	26
Tabelle 12:	Ausgaben pro Ladepunkt	29
Tabelle 13:	Ladeinfrastruktur nach Typ und Szenario in ausgewählten Jahren	30
Tabelle 14:	Angenommene Ladeleistungen der Pkw-Ladeinfrastruktur	31
Tabelle 15:	Anteile Ladeklassen an öffentlichen Ladestellen	32
Tabelle 16:	Angenommene Ladeleistungen bei Depotladepunkten	33
Tabelle 17:	Ausgaben für Wasserstofftankstellen	37
Tabelle 18:	Parameter zur Fortschreibung der Investitionen in Schienenfahrzeuge	39
Tabelle 19:	Angenommene Teuerungsraten zur Fortschreibung der nominalen Personalkosten	43

Tabelle 20:	Fortschreibung der Personalkosten im Schienenpersonenfernverkehr	44
Tabelle 21:	Lohnannahmen für BerufskraftfahrerInnen	45
Tabelle 22:	Fortschreibung der Personalkosten des Schienengüterverkehrs	46
Tabelle 23:	Spezifische Wartungskosten für Pkw	48
Tabelle 24:	Spezifische volkswirtschaftliche Energiekosten nach Energieträger	50
Tabelle 25:	Gesamtergebnis im Szenarienvergleich	61
Tabelle 26:	Überblick – Verwendete Datenquellen für das Personenverkehrsmodell	XV
Tabelle 27:	Überblick – Verwendete Datenquellen für das Güterverkehrsmodell	XVI

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Verkehrsleistung im Personenverkehr	6
Abbildung 2:	Verkehrsleistung im Schienenpersonenverkehr	7
Abbildung 3:	Verkehrsleistung im nationalen Güterverkehr	8
Abbildung 4:	Pkw-Bestand nach Antriebsart	10
Abbildung 5:	Pkw-Neuzulassungen nach Antriebsart	11
Abbildung 6:	Entwicklung Pkw-Bestand Verbrenner	11
Abbildung 7:	Bestand Leichte Nutzfahrzeuge nach Antriebsart	12
Abbildung 8:	Fahrleistung Schwere Nutzfahrzeuge nach Antriebsart	13
Abbildung 9:	Endenergieverbrauch im Inland nach Energieträger	15
Abbildung 10:	Endenergieverbrauch im Inland nach Verkehrsmitteln	16
Abbildung 11:	Treibhausgasemissionen nach Szenario	17
Abbildung 12:	Infrastruktur – Ausgaben kumuliert nach Verkehrsmittel	27
Abbildung 13:	Infrastruktur – Kosten kumuliert nach Verkehrsmittel	28
Abbildung 14:	Ladeinfrastruktur – Ausgaben kumuliert nach Verkehrsmittel	35
Abbildung 15:	Ladeinfrastruktur – Kosten kumuliert nach Verkehrsmittel	36
Abbildung 16:	Fahrzeuge und Züge – Ausgaben kumuliert nach Verkehrsmittel	41
Abbildung 17:	Fahrzeuge und Züge – Kosten kumuliert nach Verkehrsmittel	42
Abbildung 18:	Personal - Kosten kumuliert nach Verkehrsmittel	47
Abbildung 19:	Wartungskosten - Kosten kumuliert nach Verkehrsmittel	49
Abbildung 20:	Energiekosten nach Szenario und Kraftstoffart	51
Abbildung 21:	Energie - Kosten kumuliert nach Verkehrsmittel	52

Abbildung 22:	Klimaschadenskosten - Kosten kumuliert nach Verkehrsmittel	53
Abbildung 23:	Struktur der jährlichen Ausgaben in Zielszenario 1	55
Abbildung 24:	Ausgaben kumuliert nach Kategorien	56
Abbildung 25:	Jährliche Ausgaben nach Kategorien	57
Abbildung 26:	Kosten kumuliert nach Kategorien	58
Abbildung 27:	Jährliche Kosten nach Kategorien	59
Abbildung 28:	TEMPO-Schema	XIV
Abbildung 29:	Flottenmodell	XVII

Abkürzungsverzeichnis

BAB	Bundesautobahnen
BEV	Battery Electric Vehicle = batterieelektrische Fahrzeuge
BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr
BNetzA	Bundesnetzagentur
CO ₂ eq	CO ₂ -Äquivalente
DB	Deutsche Bahn AG
Difu	Deutsches Institut für Urbanistik
ESR	Effort Sharing Regulation
Fzgkm	Fahrzeugkilometer
HPC	High Power Charging = ultraschnelles Laden
HRS	Hydrogen Refueling Stations = Wasserstofftankstellen
IEA	Internationale Energieagentur
KSG	Klimaschutzgesetz
Lkw	Lastkraftwagen
LNF	Leichte Nutzfahrzeuge
MCS	Megawatt Charging System = Megawatt-Ladesystem
Mt	Millionen Tonnen
NOW	Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PJ	Petajoule
Pkm	Personenkilometer
Pkw	Personenkraftwagen
SNF	Schwere Nutzfahrzeuge (Lkw und Szm)
Szm	Sattelzugmaschinen
THG	Treibhausgas
Tkm	Tonnenkilometer
UBA	Umweltbundesamt

Zusammenfassung

Die Studie „Szenarien zur Berechnung der Kosten für die Verkehrswende in Deutschland“, durchgeführt im Auftrag von Agora Verkehrswende, analysiert die finanziellen Anforderungen und Auswirkungen verschiedener Klimaszenarien im Verkehrssektor. Ziel der Studie ist es, ein umfassendes Bild der finanziellen Belastungen und potenziellen Einsparungen durch den Übergang zu einem nachhaltigen und klimaneutralen Verkehrssystem zu skizzieren.

Trotz der allgemeinen Reduktion von Treibhausgasemissionen in Deutschland sind die Emissionen im Verkehrssektor seit 2010 bis vor Corona um fast 10 Prozent angestiegen, hauptsächlich aufgrund des Zuwachses im motorisierten Individualverkehr und dem Schwerlastverkehr. Eine Verlagerung des Verkehrs auf umweltfreundlichere Verkehrsmittel sowie eine weitgehende Elektrifizierung des Straßenverkehrs sind entscheidende Maßnahmen zur Verringerung der THG-Emissionen im Verkehr.

Zur Analyse der Ausgaben und Kosten im Verkehrssektor werden drei verschiedene Szenarien modelliert: das Referenzszenario, das auf der aktuellen Politik und absehbaren Entwicklungen ohne zusätzliche Instrumente basiert, und zwei Zielszenarien, die jeweils unterschiedliche Grade und Geschwindigkeiten bei der Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen abbilden. Das erste Zielszenario geht davon aus, dass sofort umfassende und entschlossene Maßnahmen ergriffen werden, um die Treibhausgasemissionen des Verkehrs drastisch zu reduzieren. Dazu gehören erhebliche Investitionen in die Elektrifizierung des Verkehrs, der Ausbau der Schienen- und Ladeinfrastruktur sowie die Förderung alternativer Mobilitätsformen wie des ÖPNV. Diese Maßnahmen führen zu einer raschen Reduktion der Treibhausgasemissionen. Das zweite Zielszenario verfolgt die gleichen Ziele wie das erste Zielszenario, allerdings mit einer zeitlichen Verzögerung. Die verstärkten Klimaschutzmaßnahmen setzen erst nach 2030 ein. Bis dahin entwickelt sich der Verkehrssektor wie im Referenzszenario. Ab 2030 sind dann umso rigorosere Maßnahmen erforderlich, um die kumulierten Emissionen nicht über das Niveau des ersten Zielszenarios ansteigen zu lassen.

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass zusätzliche finanzielle Investitionen notwendig sind, um die Infrastruktur für eine nachhaltige Mobilität zu schaffen, insbesondere für den Ausbau der Schieneninfrastruktur und den Aufbau einer flächendeckenden Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge. Der Umstieg auf öffentliche Verkehrsmittel ist auch mit höheren Personalkosten verbunden. Die Studie weist auch auf die Kosten hin, die in den nächsten Jahren durch die Anschaffung neuer Verkehrsmittel, insbesondere von Elektrofahrzeugen, entstehen werden.

Insgesamt zeigt die Studie, dass die Verkehrswende zwar zunächst investitionsintensiv ist, aber langfristig finanzielle Einsparungen durch geringere Energie- und Wartungskosten sowie geringere Umweltbelastungen ermöglicht. Zudem wird die Abhängigkeit von importierten fossilen Energieträgern massiv reduziert. Diese Transformation erfordert jedoch koordinierte Maßnahmen auf nationaler und internationaler Ebene, um die gesetzten Klimaziele effektiv zu unterstützen und zu erreichen.

1 Einleitung

Die Bundesregierung hat sich mit dem Klimaschutzgesetz (KSG) von 2021 das Ziel gesetzt, Deutschland bis 2045 klimaneutral zu machen. Dieses Ziel wurde auch in der jüngsten KSG-Novelle bestätigt. Ein wichtiger Schritt auf diesem Weg ist die Reduzierung der CO₂-Emissionen im Verkehrssektor. Während die Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) in Deutschland insgesamt seit 1990 deutlich gesunken sind, gab es im Verkehrssektor bisher kaum Fortschritte. Der Anteil des Verkehrs an den Gesamtemissionen ist seit 1990 von rund 13 auf 25 Prozent im Jahr 2023 gestiegen. Dies lag vor allem am stetig wachsenden Straßengüterverkehr, dem motorisierten Individualverkehr und dem damit einhergehenden wachsenden Dieselmotorenverbrauch. Um die längst überfälligen Klimabeiträge bis 2030 zu erreichen und den Verkehr bis 2045 klimaneutral zu gestalten, sind rasche und wirksame Maßnahmen erforderlich. Die Elektromobilität im Personen- und Güterverkehr ist dabei ein sehr wichtiger Hebel (Antriebswende), neben der Verlagerung des motorisierten Individual- und Straßengüterverkehrs auf umweltfreundlichere Verkehrsträger (Mobilitätswende).

Das Projekt *Klimaneutrales Deutschland 2045* skizziert den erforderlichen Weg zur Klimaneutralität auch für den Sektor Verkehr. Um die Klimaziele im Verkehr zu erreichen, sind erhebliche Investitionen, unter anderem in den Ausbau der Verkehrsinfrastruktur, des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) und der Ladeinfrastruktur für Elektromobilität notwendig. Im Rahmen dieser Studie werden die notwendigen Aufwendungen und Kosten systematisch erfasst und mithilfe eines Szenarienvergleiches quantifiziert. Das Ziel ist es, die Kosten und Investitionsbedarfe der verschiedenen Zukunftsprojektionen transparent zu machen und darüber hinaus aufzuzeigen, welche zusätzlichen Kosten – aber auch Einsparpotenziale – durch den Übergang zu einem klimaneutralen Verkehrssystem auf die Gesellschaft zukommen.

Das **Referenzszenario** ist ein Business-as-usual-Szenario. Angelehnt an das „Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenario“ (MWMS) aus dem *Projektionsbericht 2023* für Deutschland wurde eine aktualisierte Referenzentwicklung gerechnet, welche auf den aktuellen statistischen Daten aufsetzt. Die Rahmendaten wurden nach Möglichkeit direkt aus dem *Projektionsbericht* übernommen.

Im Fokus der Erarbeitung der **beiden Zielszenarien** stand die Beantwortung der Frage: Wie sieht ein klimaneutrales Verkehrssystem aus und auf welchem Pfad ist ein solches zu erreichen? Um die Vergleichbarkeit zum Referenzszenario herzustellen, beruhen alle Szenarien auf den gleichen gesamtmodalen Verkehrsentwicklungen und auch die Rahmendaten, wie die Bevölkerungsentwicklung, die wirtschaftliche Entwicklung oder die Energiepreisprojektionen, sind in allen Szenarien identisch. Die Unterschiede zwischen den Szenarien ergeben sich aus strukturellen Entwicklungen (zum Beispiel *Modal Split*) oder technischen Maßnahmen (Effizienzentwicklung, Neuzulassungsstrukturen), ohne dass politische Maßnahmen explizit modelliert wurden.

Die beiden Zielszenarien basieren auf dem Szenario *Klimaneutrales Deutschland 2045* und unterscheiden sich in der Umsetzungsgeschwindigkeit von Klimaschutzmaßnahmen. Im ersten Zielszenario werden schnelle Maßnahmen ergriffen, um das ursprüngliche Ziel von 85 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten (Mt. CO₂eq) in 2030 zu erreichen. Im zweiten Zielszenario bleiben die kumulierten Treibhausgasemissionen bis 2045 gleich hoch wie im ersten Zielszenario, jedoch wird erst nach 2030 verstärkt in Klimaschutzmaßnahmen im Verkehrssektor investiert. Bis 2030 entwickeln sich Verkehrsmengen, Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen identisch zum

Referenzszenario. Ab 2030 sind dann drastische Maßnahmen erforderlich. In beiden Zielszenarien wird im Jahr 2045 Klimaneutralität im nationalen Verkehr erreicht.

Die Ergebnisse dieser Studie sollen fundierte finanz- und klimapolitische Empfehlungen ermöglichen. Sie sollen zudem als Entscheidungs- und Planungsgrundlage dienen und die Weichen für eine nachhaltige Verkehrspolitik stellen. Ziel der Studie ist es nicht nur, die gesellschaftlichen Kosten der Verkehrswende zu quantifizieren und zu untersuchen. Es soll auch geprüft werden, ob und inwieweit sich die Verkehrswende volkswirtschaftlich „rechnet“.

2 Verkehrsszenarien

2.1 Konzeption der Szenarien

Im Rahmen dieser Studie werden die volkswirtschaftlichen Kosten des Verkehrs anhand von drei Szenarien – mittels einem Referenzszenario und zwei Zielszenarien – analysiert. Zentrale Grundlage für alle Szenarien ist eine identische gesamtmodale Entwicklung der Verkehrsnachfrage. Dies bedeutet, dass in den Szenarien keine Einschränkungen der Mobilität – weder für Personen noch für Güter - unterstellt werden.

Das Referenzszenario stützt sich auf den *Projektionsbericht 2023* (PB 23) der Bundesregierung und insbesondere auf das MWMS-Szenario (UBA 2023b). Der Kerngedanke der beiden Zielszenarien besteht darin, die Treibhausgasemissionen im Verkehr unter Wahrung der Mobilitätsbedürfnisse von Bürgerinnen und Bürgern sowie der Wirtschaft deutlich zu reduzieren. Der Unterschied zwischen den Zielszenarien besteht darin, dass in Zielszenario 1 sofort gehandelt wird, während in Zielszenario 2 eine spätere, aber dafür drastischere Umsteuerung erfolgt. Diese kann erforderlich werden, wenn in den kommenden Jahren die jeweiligen Bundesregierungen verstärkte Klimaschutzmaßnahmen zunächst verschieben.

Nach einem Rückgang infolge der Corona-Pandemie in den Jahren 2020 und 2021 stiegen die THG-Emissionen des Verkehrssektors im Jahr 2022 erneut leicht an auf 149 Mt. CO₂eq. Im MWMS-Szenario sinken die THG-Emissionen im Verkehr bis 2030 kontinuierlich auf 111 Mt. CO₂eq, was einem Rückgang um 27 Prozent gegenüber 2023 (UBA 2023b) entspricht. Der Bestand an batterieelektrischen Personenkraftwagen (BEV-Pkw) würde bis zum Jahr 2030 auf 8,5 Millionen (Mio.) Fahrzeuge ansteigen. Trotz dieser Maßnahme wird im Referenzszenario für das Jahr 2030 eine Emissionslücke von 26 Mt. CO₂eq zum ursprünglichen KSG-Ziel von 85 Mt. CO₂eq erwartet, was zu einer kumulierten Verfehlung des Ziels bis 2030 um 187 Mt. CO₂eq führt.

Beide Zielszenarien streben Klimaneutralität im Jahr 2045 an, auch in Summe ergeben sich trotz der unterschiedlichen Entwicklung in den beiden Zielszenarien kumulierte Emissionen in gleicher Höhe. Zielszenario 1 erreicht zudem das ursprüngliche KSG-Ziel von 85 Mt. CO₂eq im Jahr 2030. Dafür werden die Ziele der Antriebswende gemäß dem Koalitionsvertrag – 15 Mio. BEV-Pkw und ein Drittel elektrische Fahrleistung bei schweren Nutzfahrzeugen (SNF) – erreicht. Um die geforderten THG-Reduktionen in Zielszenario 1 zu erzielen, wird zusätzlich eine verstärkte Verlagerung des Personen- und Güterverkehrs auf die Schiene sowie den öffentlichen Straßenverkehr vorausgesetzt.



Das Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG)

Mit dem Klimaschutzplan 2050 hat die Bundesregierung 2016 erstmals eine nationale Klimastrategie vorgelegt. Demnach soll Deutschland bis zum Jahr 2050 klimaneutral werden. Im Jahr 2019 wurde dieses Ziel mit dem KSG erstmals rechtlich verankert. Mit dem Urteil des Bundesverfassungsgerichts vom 29. April 2021 musste das erste KSG jedoch bereits überarbeitet und die Klimaschutzziele verschärft werden. Die Treibhausgasneutralität in Deutschland wurde auf das Jahr 2045 vorgezogen. Darüber hinaus sollen die Emissionen bis 2030 um 65 Prozent gegenüber 1990 sinken statt wie bisher nur um 55 Prozent. Bis 2040 wird eine Reduktion der THG-Emissionen um 88 Prozent gefordert. Mit der Novellierung wurden also deutlich verschärfte Zwischenziele in das Gesetz aufgenommen. Zudem wurden die sektoralen Minderungsziele verbindlich festgelegt (bpb 2022).

Ein Entwurf für eine erneute Reform des KSG wurde im Sommer 2023 von Bundeswirtschaftsminister Habeck vorgelegt. Dieser Entwurf wurde bereits im Juni 2023 vom Bundeskabinett beschlossen und seitdem im Bundestag beraten (Die Zeit 2024). Am 15.04.2024 kam es nach der Androhung von Fahrverboten durch Bundesverkehrsminister Wissing zu einer Einigung zwischen den Regierungsfractionen. Für die einzelnen Sektoren gibt es nun keine verbindlichen gesetzlichen Ziele mehr. Bei einer Überschreitung der Gesamtemissionen, muss die Bundesregierung jedoch Maßnahmen zur Umsteuerung vorlegen. Auch wird die Einhaltung der Klimaziele nun nicht mehr rückwirkend und sektorspezifisch, sondern mittels einer sektorübergreifenden mehrjährigen vorrausschauenden Gesamtrechnung für die Jahre 2021 bis 2030 kontrolliert (UBA 2024b).

In Zielszenario 2 werden zusätzliche Klimaschutzmaßnahmen im Verkehr erst nach 2030 unterstellt. Bis zum Jahr 2030 verlaufen die Pfade daher wie im Referenzszenario. Ab 2030 müssen die THG-Emissionen im Verkehr stark reduziert werden, um bis 2045 die gleichen kumulierten Emissionen wie in Zielszenario 1 zu erreichen. Die höheren THG-Emissionen von Zielszenario 2 gegenüber Zielszenario 1 im Zeitraum bis 2030 müssen de facto in den Jahren nach 2030 aufgeholt werden. Um diese hohen Emissionsminderungen zu erreichen, werden Pkw mit Verbrennungsmotor vorzeitig stillgelegt (durch ein Abwrackprogramm) und zusätzlich werden synthetische Kraftstoffe im Straßenverkehr eingesetzt.

Die vorliegende **Studie liefert die quantitativen Grundlagen für den von Agora Verkehrswende verfassten Kompaktbericht** „Verkehrswende als Mehrwert - Warum es sich volkswirtschaftlich lohnt, schnell in die Reduzierung von Treibhausgasemissionen in Deutschlands Verkehrssektor zu investieren“. Darin werden die Szenarien wie folgt unterschieden:

Tabelle 1: Bezeichnung der Szenarien in den unterschiedlichen Berichten

Vorliegender Bericht	Kompaktbericht von Agora Verkehrswende
Referenzszenario	Referenzszenario
Zielszenario 1	Wende-2025-Szenario
Zielszenario 2	Wende-2030-Szenario

| eigene Tabelle

2.2 Entwicklung der Verkehrsnachfrage

Eine wichtige Randbedingung bei der Konzeption der Szenarien war, dass die Mobilitätsbedürfnisse von Bürgerinnen und Bürgern sowie der Wirtschaft auch in Zukunft gewahrt bleiben. Die gesamtmodale Nachfrage entwickelt sich daher in allen Szenarien gleich. In den Zielszenarien wird jedoch eine stärkere Verlagerung hin zu klimaschonenderen Verkehrsträgern angenommen. Deshalb ergeben sich strukturelle Unterschiede zwischen den Szenarien, welche in den nachfolgenden Unterkapiteln beschrieben werden.

2.2.1 Personenverkehr

Beim Personenverkehr wird das Mobilitätsverhalten von Menschen untersucht und für zukünftige Jahre projiziert. Um den Personenverkehr in statistischen Kennzahlen zu messen, werden unter anderem folgende Größen verwendet: Die Anzahl der Wege, die zurückgelegten Personenkilometer oder die zurückgelegten Fahrzeugkilometer. All diese Größen haben sich in Deutschland bis zum Jahr 2019 kontinuierlich erhöht, was sich sowohl in der steigenden Anzahl beförderter Personen als auch in der Zunahme der zurückgelegten Wege und Distanzen widerspiegelt. Die Entwicklung wird differenziert nach folgenden Verkehrsmitteln berechnet:

- Motorisierter Individualverkehr (Pkw, Mopeds, Krafträder)
- Schienenpersonenverkehr (Schienenpersonenfernverkehr, Schienenpersonennahverkehr, Stadtbahnen¹)
- Busverkehr (Fernbusverkehr, Busnahverkehr)
- Nicht-motorisierter Verkehr (Fuß- und Radverkehr)
- Nationaler Luftverkehr

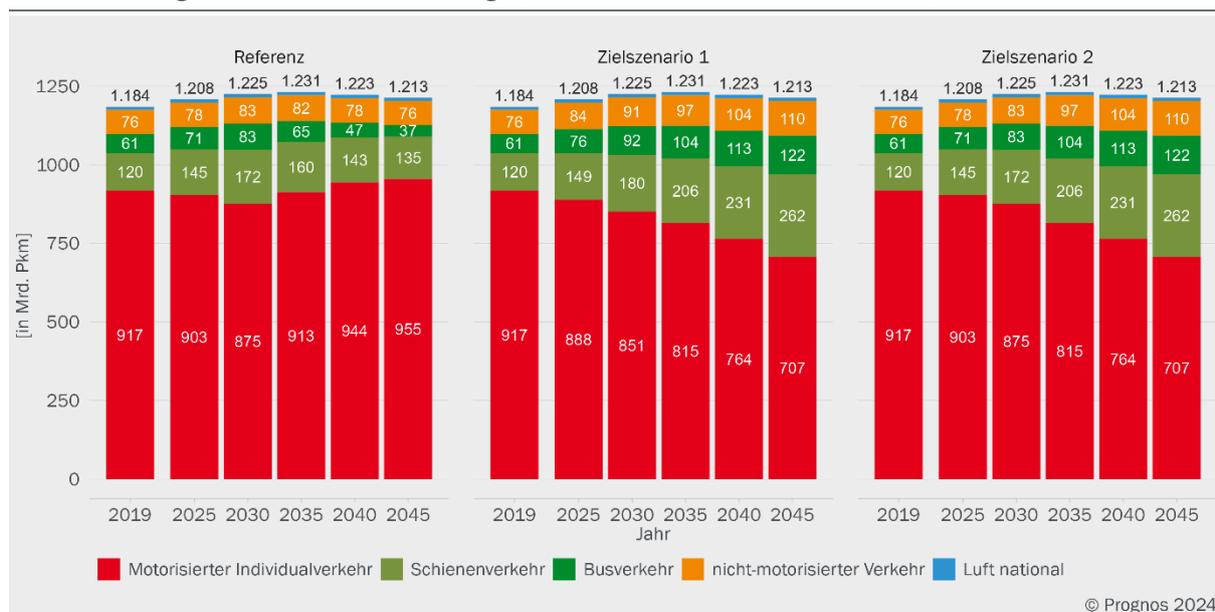
¹ Unter Stadtbahnen fallen im Rahmen dieser Studie spurgebundene Schienenbahnen des ÖPNV und damit neben Straßenbahnen beziehungsweise Trams auch U-Bahnen.

Gesamtmodal entwickelt sich die Verkehrsnachfrage in allen Szenarien gleich. Die Entwicklung im Referenzszenario entspricht der im *Projektionsbericht 2023* (UBA 2023b). Die Verkehrsleistung steigt bis 2035 auf rund 1.230 Milliarden Personenkilometer (Mrd. Pkm) an und sinkt dann bis 2045 bedingt durch die demografische Entwicklung leicht ab.

Bis 2030 kommt es zu nur geringfügigen Unterschieden im *Modal Split* zwischen dem Referenzszenario und dem Zielszenario 1. Anschließend verstärken sich die Unterschiede zwischen den Szenarien bis zum Zieljahr 2045 deutlich. Die Nachfrage im motorisierten Individualverkehr sinkt bis 2030 in allen Szenarien, wobei der MIV in Zielszenario 1 im Jahr 2030 einen deutlich geringeren Anteil an der Verkehrsleistung hat als in den beiden anderen Szenarien. Nach 2030 sinkt die MIV-Nachfrage in beiden Zielszenarien bis 2045 auf rund 700 Mrd. Pkm, während sie im Referenzszenario aufgrund der im relativen Vergleich günstigeren Elektromobilität wieder ansteigt. Dies geht unter anderem zulasten der Nachfrage im Umweltverbund.² In den beiden Zielszenarien nehmen dagegen insbesondere der Schienenverkehr, der Busverkehr sowie der nicht-motorisierte Verkehr zulasten der Nachfrage im MIV zu (Abbildung 1).

Abbildung 1: Verkehrsleistung im Personenverkehr

Verkehrsleistung im Inland nach Verkehrszweigen, Szenarien für die Jahre 2019 bis 2045, in Mrd. Pkm



eigene Abbildung

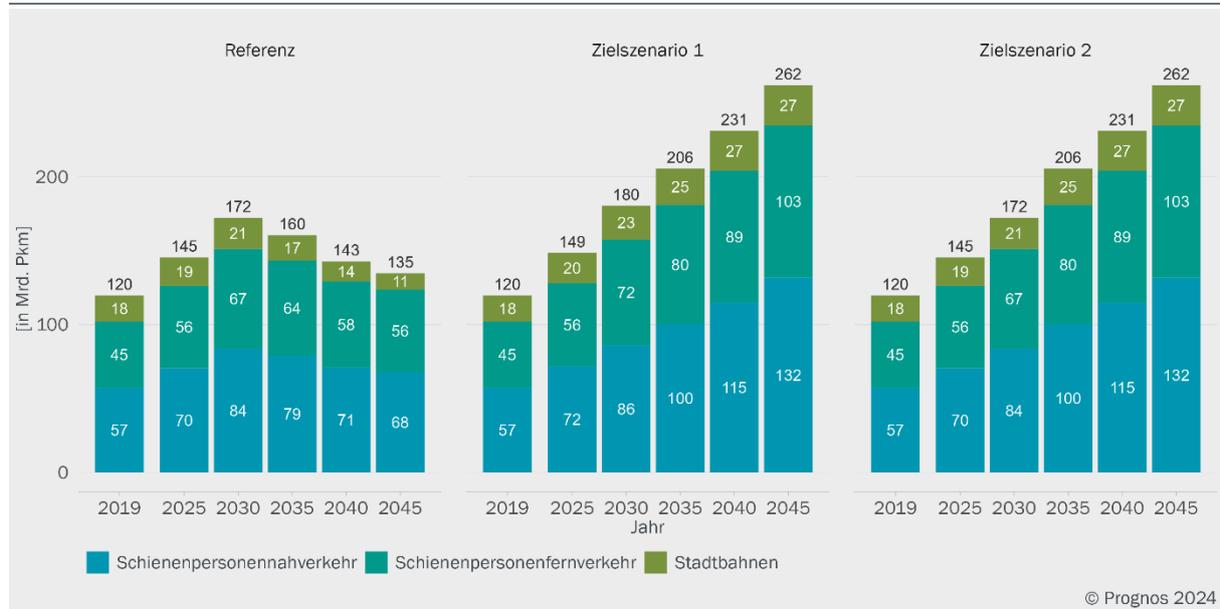
Betrachtet man die Entwicklung der Verkehrsnachfrage nach Verkehrsmittel für die beiden Zielszenarien, so ergibt nach 2035 ein identisches Bild. Die Verkehrsleistung im Schienenpersonenverkehr wird sich bis 2045 mehr als verdoppeln. Auch die Nachfrage im Stadtbahnverkehr steigt, wenn auch in etwas geringerem Umfang. Bis 2030 ist in Zielszenario 2 – analog zum Referenzszenario – von einer Nachfragesteigerung beim Schienenverkehr um 43 Prozent gegenüber

² Der Umweltverbund bezeichnet das Zusammenspiel verschiedener umweltfreundlicher Verkehrsmittel im Personenverkehr. Er umfasst in der Regel den Fuß- und Radverkehr sowie den ÖPNV (teilweise auch Carsharing). Der Umweltverbund fördert die intermodale Mobilität, also die kombinierte Nutzung verschiedener Verkehrsmittel innerhalb eines Weges oder einer Reise.

2019 auszugehen. Im Referenzszenario sinkt nach 2030 die Nachfrage beim Schienen- und beim Busverkehr deutlich, dies aufgrund der steigenden Nachfrage beim MIV (Abbildung 2).

Abbildung 2: Verkehrsleistung im Schienenpersonenverkehr

Verkehrsleistung im Inland nach Verkehrszweigen, Szenarien für die Jahre 2019 bis 2045, in Mrd. Pkm



eigene Abbildung

2.2.2 Güterverkehr

Der Güterverkehr beschreibt die Bewegung von Gütern zwischen verschiedenen geografischen Orten. Analog zum Personenverkehr werden unter anderem folgende Größen verwendet, um den Güterverkehr in statistischen Kennzahlen zu messen: die Anzahl der Wege, die zurückgelegten Tonnenkilometer oder die zurückgelegten Fahrzeugkilometer (Fzghm). Im Gegensatz zum Personenverkehr war in den Entwicklungen bis 2019 kein eindeutiger Trend erkennbar: Während die Fahrleistung der leichten Nutzfahrzeuge (LNF) und der Sattelzugmaschinen (Szm) seit der Jahrtausendwende deutlich zunahm, ging die der Lastkraftwagen (Lkw) in der Summe zurück. Die auf der Schiene erbrachte Verkehrsleistung stieg stark an, auf dem Wasser dagegen wurden weniger Tonnenkilometer (Tkm) erbracht. Die Güterverkehrsnachfrage und die Entwicklung der Endenergieverbräuche wird differenziert für folgende Verkehrsmittel modelliert:

- Straßenverkehr (LNF, Lkw in verschiedene Gewichtsklassen unterteilt, Szm)
- Schienenverkehr (Güterzüge)
- Schiffsverkehr (Binnenschifffahrt)
- Nationaler Luftverkehr

Gesamtmodal entwickelt sich die Verkehrsnachfrage auch im Güterverkehr in allen Szenarien gleich. Die Entwicklung im Referenzszenario entspricht der im Projektionsbericht 2023 (UBA 2023b), die Entwicklung in Zielszenario 1 stützt sich auf die Studie Klimaneutrales Deutschland (Prognos AG et al. 2021).

Die Entwicklung der Verkehrsleistung im Güterverkehr orientiert sich dabei jeweils an der hinterlegten Prognose des BIP. Sie wird demnach in allen Szenarien deutlich steigen: 754 Mrd. Tkm im Jahr 2030 und 853 Mrd. Tkm im Jahr 2045 bedeuten eine Steigerung um 11 beziehungsweise 26 Prozent gegenüber 2019 (679 Mrd. Tkm).

Unterschiede gibt es hinsichtlich der Entwicklung des *Modal Split*: Ausgehend von einem Anteil von 19 Prozent im Jahr 2019 steigt im Referenzszenario und in Zielszenario 2 der Anteil der Schiene an der Verkehrsleistung bis 2030 auf knapp 23 Prozent (172 Mrd. Tkm), in Zielszenario 1 sogar auf 24 Prozent (181 Mrd. Tkm). Im Jahr 2045 werden in den beiden Zielszenarien fast 26 Prozent (220 Mrd. Tkm) der Verkehrsleistung auf der Schiene erbracht, während der Anteil der Schiene im Referenzszenario mit rund 21 Prozent (182 Mrd. Tkm) niedriger liegt als 2030.

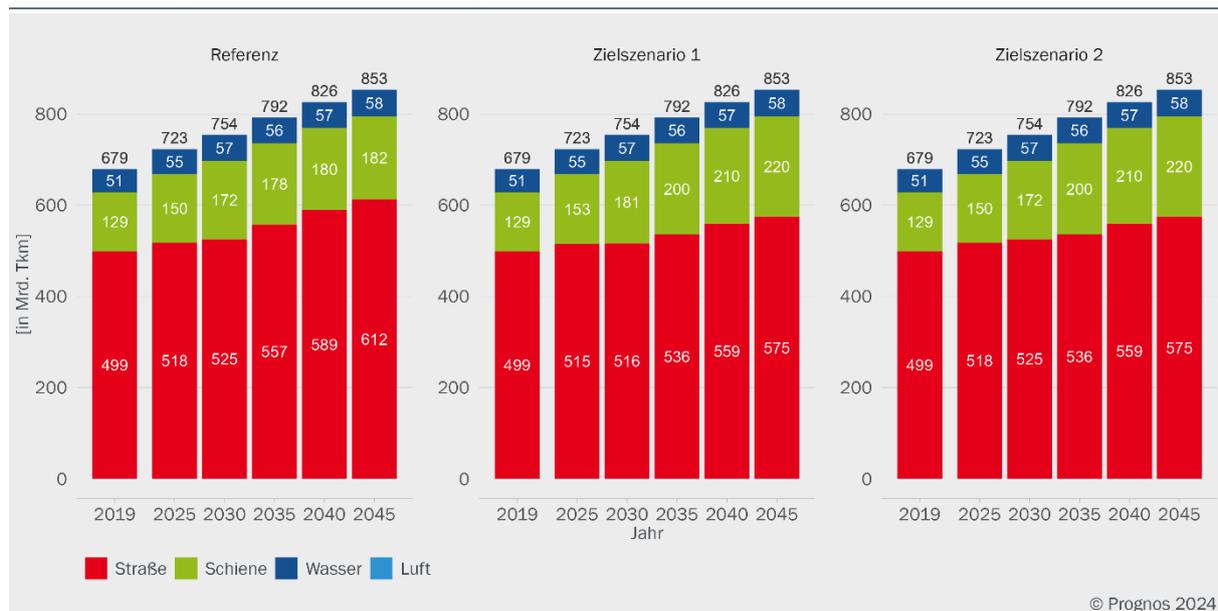
Die Binnenschifffahrt verzeichnet speziell ab 2025 absolut nur geringe Zuwächse, während die Verkehrsleistungen von Straße und Schiene deutlich steigen: Im Referenzszenario werden im Jahr 2045 gegenüber 2019 113 Mrd. Tkm mehr auf der Straße (+ 23 Prozent gegenüber 2019) und 53 Mrd. Tkm (+ 41 Prozent) mehr auf der Schiene geleistet, in den Zielszenarien sind es 76 Mrd. Tkm mehr auf der Straße (+ 15 Prozent) und 91 Mrd. Tkm (+ 71 Prozent) mehr auf der Schiene.

Der Anteil der auf der Schiene erbrachten Verkehrsleistung im Güterverkehr wächst vor allem zwischen 2025 und 2030 deutlich. Während im Referenzszenario die Verkehrsleistung auf der Straße absolut bereits ab 2030 (wieder) stärker wächst als die der Schiene, ist dies in den beiden Zielszenarien erst nach 2035 der Fall.

Der nationale Luftverkehr spielt im Güterverkehr eine untergeordnete Rolle und der internationale Luftverkehr ist – wie auch der internationale Seeverkehr – für die Betrachtung der nationalen Emissionsziele irrelevant.

Abbildung 3: Verkehrsleistung im nationalen Güterverkehr

Verkehrsleistung national nach Verkehrszweigen, Szenarien für die Jahre 2019 bis 2045, in Mrd. Tkm



eigene Abbildung

2.3 Entwicklung der Antriebstechnologien

2.3.1 Pkw

Voraussetzung für die Halbierung der Emissionen des Pkw-Verkehrs bis 2030 und damit für die Erreichung der Klimaziele ist die Elektrifizierung der Pkw-Flotte. Mit wirksamen Anpassungen der dafür relevanten Instrumente kann ein hoher Elektrifizierungsanteil bereits in den nächsten Jahren erreicht werden. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die modellierte Struktur des Pkw-Bestandes und der Neuzulassungen nach Antriebsart in den untersuchten Szenarien.

Der Bestand und die Neuzulassungen entwickeln sich entsprechend der Verkehrsnachfrage. Im Referenzszenario nimmt der Pkw-Bestand bis 2030 leicht ab und steigt dann bis 2045 auf rund 54 Mio. Pkw an (+ 15 Prozent). In den beiden Zielszenarien hingegen geht der Pkw-Bestand nach einem leichten Anstieg Mitte der 2020er-Jahre bis 2045 deutlich zurück und fällt sogar unter das Niveau von 2019 (- 19 Prozent).

Dabei entwickelt sich die Antriebsstruktur des Bestandes unterschiedlich: Bis 2030 steigt der Anteil der Pkw mit Elektro-Antrieb in Zielszenario 1 am stärksten an, um das Ziel von 15 Mio. Fahrzeugen zu erreichen. Damit sind in Zielszenario 1 im Jahr 2030 fast doppelt so viele BEV-Pkw im Bestand wie in den beiden anderen Szenarien. Ab 2035 machen BEV in beiden Zielszenarien bereits mehr als die Hälfte des Pkw-Bestands aus, ab 2040 dominieren diesen deutlich. Dabei erfolgt die Elektrifizierung in Zielszenario 2 aufgrund des modellierten Abwrack-Programms deutlich schneller (siehe Zielszenario 2 in Abbildung 5). Bereits im Jahr 2033 übersteigt der BEV-Bestand in Zielszenario 2 den Bestand in Zielszenario 1. Bis 2045 ist der relative Anteil der BEV-Pkw am Gesamtbestand in Zielszenario 2 am höchsten, obwohl im Referenzszenario absolut die meisten BEV-Pkw zu verzeichnen sind (Abbildung 4).

Abwrack-Programm ab 2031

Um den Bestand der Pkw mit Benzin- und Diesel-Antrieben nach 2030 so schnell wie nötig zu reduzieren, wurde in Zielszenario 2 ein Abwrack-Programm in den Jahren 2031 bis 2037 modelliert.

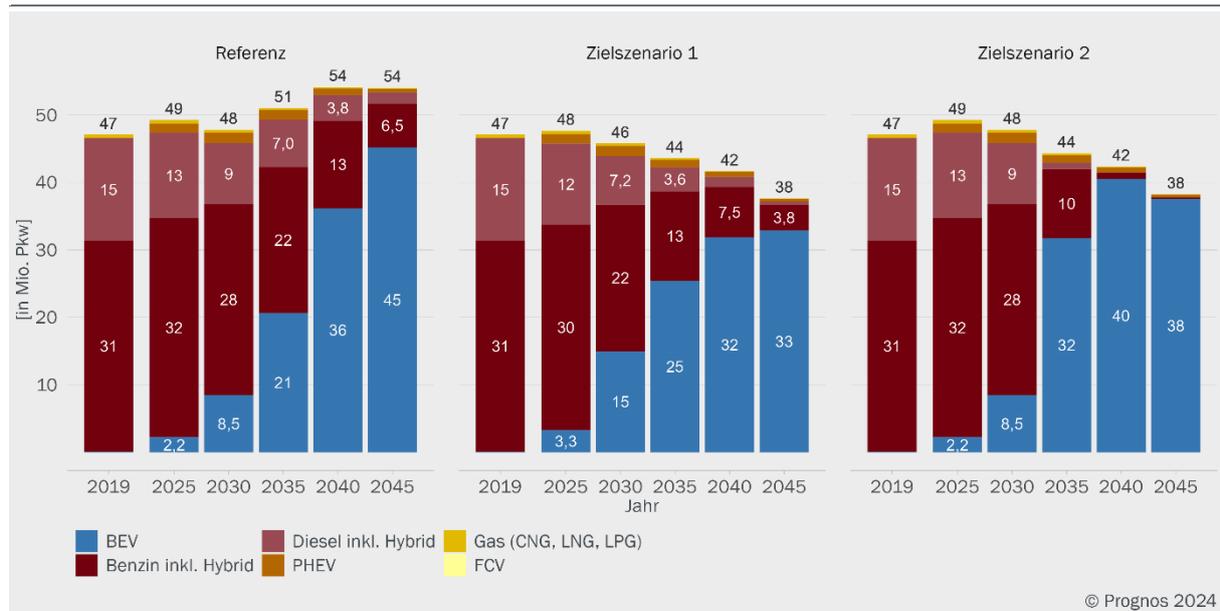
In diesen Jahren wird angenommen, dass jährlich zusätzlich rund 2 Mio. Pkw mit fossilen Antrieben durch batterieelektrisch angetriebene Pkw ersetzt werden. Der Bestand an BEV-Pkw steigt dadurch schnell an, von 8,5 Mio. im Jahr 2030 auf 32 Mio. Pkw im Jahr 2035 und 40 Mio. Pkw im Jahr 2040 – der Bestand an Benzin- und Diesel-Fahrzeugen nimmt entsprechend rasant ab (37 Mio./ 11 Mio./ 1 Mio.). Im Jahr 2040 sind folglich bereits knapp 96 Prozent aller Pkw elektrifiziert. Im Vergleich dazu: Im Referenzszenario sind es im Jahr 2040 rund 67 Prozent (36 Mio. BEV-Pkw, 17 Mio. mit Benzin- oder Diesel-Antrieb), in Zielszenario 1 etwa 76 Prozent (32 Mio. BEV-Pkw, 9 Mio. mit Benzin- oder Diesel-Antrieb).

Der Anteil der Benzin-Pkw am Bestand nimmt im Referenzszenario und in Zielszenario 1 bis 2045 relativ kontinuierlich ab. In Zielszenario 2 entfaltet das modellierte Abwrack-Programm in den 2030er-Jahren seine Wirkung und es kommt zu einem schnellen Rückgang der Pkw mit Benzin- und Diesel-Antrieben.

Diesel-Pkw verschwinden in den Zielszenarien bis 2045 fast vollständig aus dem Bestand, wobei sie in Zielszenario 2 bereits ab 2035 (ebenfalls aufgrund des Abwrack-Programms) praktisch keine Rolle mehr spielen. Die Antriebsarten FCV, Gas und PHEV haben in allen Szenarien einen geringen Anteil (Abbildung 4).

Abbildung 4: Pkw-Bestand nach Antriebsart

Szenarien für die Jahre 2019 bis 2045, in Mio. Pkw



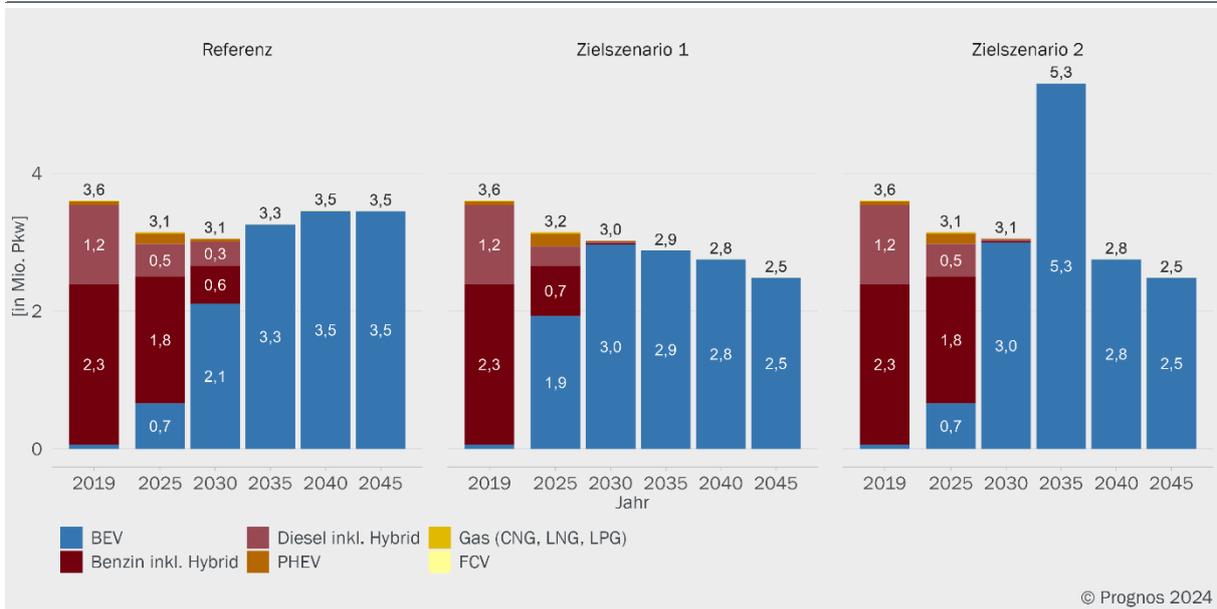
eigene Abbildung

Die Zahl der Neuzulassungen bleibt im Referenzszenario bis auf einen leichten Rückgang in den 2020er- und 2030er-Jahren relativ konstant. In den beiden Zielszenarien geht sie bis 2045 deutlich zurück. Der starke Anstieg der Neuzulassungen um 2035 in Zielszenario 2 ist auf das bereits erläuterte Abwrack-Programm zurückzuführen und wird ausschließlich von BEV-Neuzulassungen getragen. In den Zielszenarien 1 und 2 dominieren die BEV-Antriebe bereits im Jahr 2030 die Neuzulassungen bei den Pkw. Diesel- und Benzin-Pkw verschwinden Anfang der 2030er-Jahre fast vollständig bei den Neuzulassungen. Im Referenzszenario ist dies ab dem Jahr 2035 der Fall (Abbildung 5).

In Abbildung 6 ist nochmals gesondert die Entwicklung des Bestandes der fossil betriebenen Pkw abgebildet. Es ist deutlich zu erkennen, wie dieser bereits ab 2021 in allen Szenarien sinkt. Im Referenzszenario und in Zielszenario 2 sinkt die Anzahl der fossil betriebenen Fahrzeuge bis 2030 um 20 Prozent gegenüber 2019, in Zielszenario 1 sogar um 38 Prozent. Nach 2030 werden in Zielszenario 2 aufgrund des modellierten Abwrackprogramms jährlich rund zwei Millionen Pkw mit Verbrennungsmotor frühzeitig stillgelegt, dies zeigt sich auch deutlich in der Entwicklung des Bestandes. Ab 2030 erfolgt in den Zielszenarien und ab 2035 auch im Referenzszenario eine nahezu vollständige Elektrifizierung der Neuzulassungen (Abbildung 5 und Abbildung 6).

Abbildung 5: Pkw-Neuzulassungen nach Antriebsart

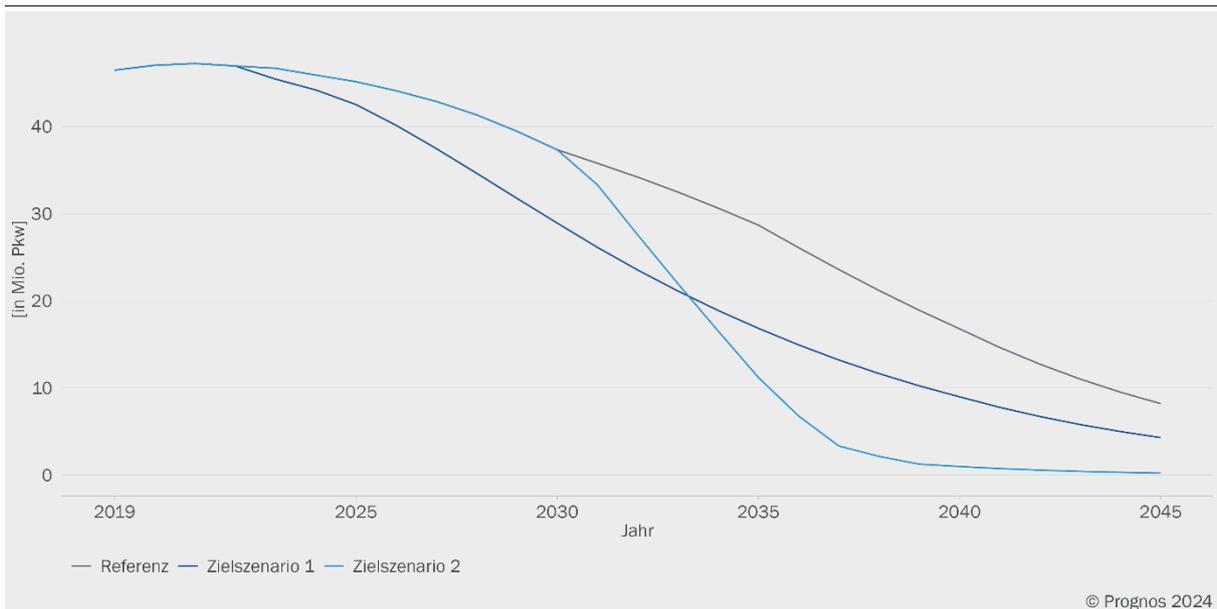
Szenarien für die Jahre 2019 bis 2045, in Mio. Pkw



eigene Abbildung

Abbildung 6: Entwicklung Pkw-Bestand Verbrenner

Szenarien für die Jahre 2019 bis 2045, in Mio. Pkw



eigene Abbildung

2.3.2 Straßengüterverkehr und Busse

Auch die Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs und der Busflotte ist wesentlicher Bestandteil auf dem Weg zu einem klimaneutralen Verkehrssystem. Im Folgenden werden – jeweils differenziert nach Antriebsarten – die Bestandsentwicklungen von LNF sowie von Bussen in den einzelnen Szenarien beschrieben. Für die SNF wird die Entwicklung der Fahrleistung dargestellt, da gemäß Koalitionsvertrag im Jahr 2030 ein Drittel der SNF-Fahrleistung elektrisch erbracht werden soll.

Leichte Nutzfahrzeuge

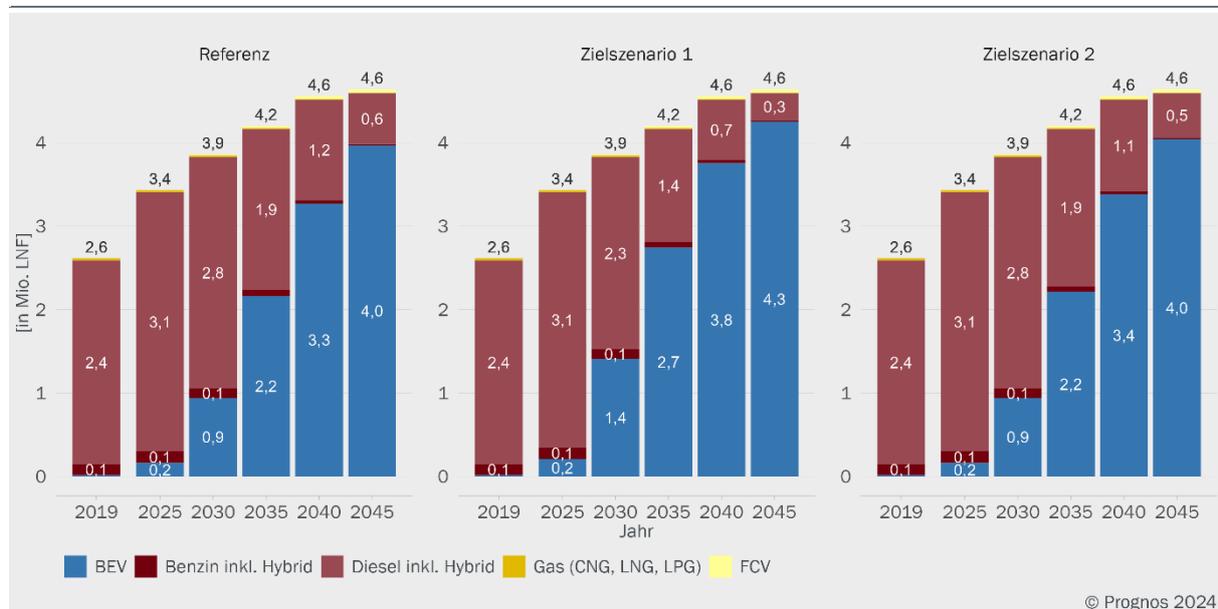
Der Bestand der LNF nimmt in allen Szenarien bis 2045 deutlich zu (+ 77 Prozent), wobei der Großteil des Zuwachses (+ 50 Prozent) bereits bis 2030 erfolgt.

Gleichzeitig steigt in allen Szenarien der Anteil der batterieelektrisch angetriebenen Fahrzeuge von 0,7 Prozent im Jahr 2019 auf über 85 Prozent im Jahr 2045 an. Die Entwicklungen des Bestandes sind im Referenzszenario und Zielszenario 2 nahezu gleich: Im Jahr 2030 fahren 0,9 Mio. LNF mit BEV-Antrieb (23 Prozent), im Jahr 2045 sind es 4,0 Mio. (87 Prozent). In Zielszenario 1 sind 2030 bereits 1,4 Mio. BEV-LNF angemeldet (36 Prozent), 2045 sind es 4,3 Mio. (93 Prozent).

Der Anteil der Diesel-Fahrzeuge am LNF-Bestand nimmt dementsprechend bis 2045 deutlich ab. Fahrzeuge mit anderen Antrieben spielen bei den LNF keine wesentliche Rolle.

Abbildung 7: Bestand Leichte Nutzfahrzeuge nach Antriebsart

Szenarien für die Jahre 2019 bis 2045, in Mio. LNF



eigene Abbildung

Schwere Nutzfahrzeuge

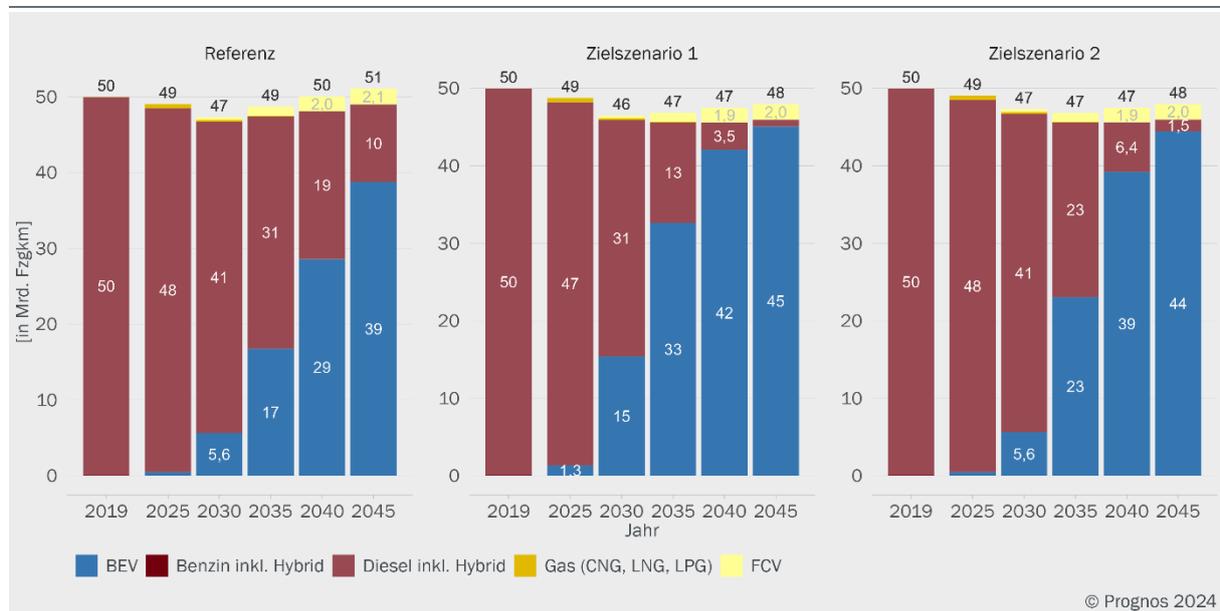
Auch bei den SNF dominieren in allen Szenarien auf lange Sicht die batterieelektrisch betriebenen Fahrzeuge. Aktuell sind diese noch kaum verbreitet, nur vereinzelte Fahrzeuge fahren nicht mit Dieselmotoren.

Dies ändert sich in Zielszenario 1 schon sehr früh: Bereits im Jahr 2030 wird knapp ein Drittel der Fahrleistung der SNF von BEV-Fahrzeugen (32 Prozent) geleistet, fünf Jahre später sind es mehr als zwei Drittel. In Zielszenario 2 setzt die Elektrifizierung erst etwas später ein: Im Jahr 2035 wird etwa die Hälfte der SNF-Fahrzeugkilometer mittels batterieelektrischem Antrieb zurückgelegt. Im Referenzszenario dauert es noch etwas länger, bis die BEV-Fahrzeuge die Fahrleistung dominieren; hier werden im Jahr 2035 nur knapp mehr als ein Drittel, im Jahr 2040 dann knapp 60 Prozent der SNF-Fahrzeugkilometer, mit BEV-Fahrzeugen gefahren. Während in beiden Zielszenarien die Fahrleistung im Jahr 2045 nahezu komplett batterieelektrisch erbracht wird, erreichen Fahrzeuge mit Diesel-Antrieb im Referenzszenario noch immer einen Anteil von rund 10 Prozent. Die Brennstoffzelle ist und bleibt eine teure Antriebstechnologie, die sich nur bei wenigen Fahrprofilen (hauptsächlich Langstrecke) durchsetzen wird.

In allen Szenarien sinkt die Fahrleistung der SNF bis 2030 leicht, um anschließend wieder anzusteigen. Im Referenzszenario liegt der Gesamtwert im Jahr 2045 leicht über und in den Zielszenarien jeweils leicht unter dem Wert des Jahres 2019.

Abbildung 8: Fahrleistung Schwere Nutzfahrzeuge nach Antriebsart

Szenarien für die Jahre 2019 bis 2045, in Mrd. Fzgkm



eigene Abbildung

Busse

Die Entwicklung der Busflotte unterscheidet sich in beiden Zielszenarien sehr deutlich vom Referenzszenario. Bis 2030 wächst der Bus-Bestand in allen Szenarien von rund 80.000 Fahrzeugen im Jahr 2019 auf über 100.000 Fahrzeuge. Da der MIV im Referenzszenario durch die Elektrifizierung günstiger wird, geht die Nachfrage bei den Bussen nach 2030 sehr stark zurück (46.000 Fahrzeuge). In beiden Zielszenarien setzt sich das starke Wachstum dagegen bis zum Jahr 2045 (152.000 Fahrzeuge) fort (Prognos AG et al. 2021; UBA 2023b).

Dabei steigern die BEV-Busse nach und nach ihren Anteil am Gesamtbestand. Bis 2025 fahren in der Referenz sowie in den beiden Zielszenarien rund 5 Prozent aller Busse mit batterieelektrischem Antrieb, im Jahr 2030 sind es bereits 19 Prozent im Referenzszenario und Zielszenario 2 und sogar 24 Prozent in Zielszenario 1. Im Jahr 2045 kommen BEV-Busse im Referenzszenario auf einen Anteil von 65 Prozent, in Zielszenario 2 auf 76 Prozent und in Zielszenario 1 auf 78 Prozent.

2.4 Energieverbrauch

Als Endenergieverbrauch wird der Energiebedarf der Letztverbraucher wie Industrie und private Haushalte bezeichnet. Er hat in Deutschland seit den 1990er-Jahren nur geringfügig abgenommen. Dieser Rückgang ist hauptsächlich auf Effizienzsteigerungen zurückzuführen, welche durch das Wirtschaftswachstum in Deutschland stark kompensiert wurden. Am gesamten Endenergieverbrauch hatte der Verkehrssektor 2022 einen Anteil von ca. 30 Prozent. Bedeutend für den Endenergieverbrauch im Verkehr ist vor allem der Kraftstoffverbrauch, welcher in den Jahren vor Corona kontinuierlich anstieg. Grund für den Anstieg bis 2019 war die starke Zunahme der Verkehrsleistungen im Personen- als auch im Gütertransport auf der Straße, welche die technischen Verbesserungen an den Fahrzeugen überkompensierten. Im Jahr 2022 lag der Endenergieverbrauch im Verkehr über dem Verbrauch der beiden pandemiegeprägten Vorjahre, jedoch noch unter dem Verbrauch von 2019.

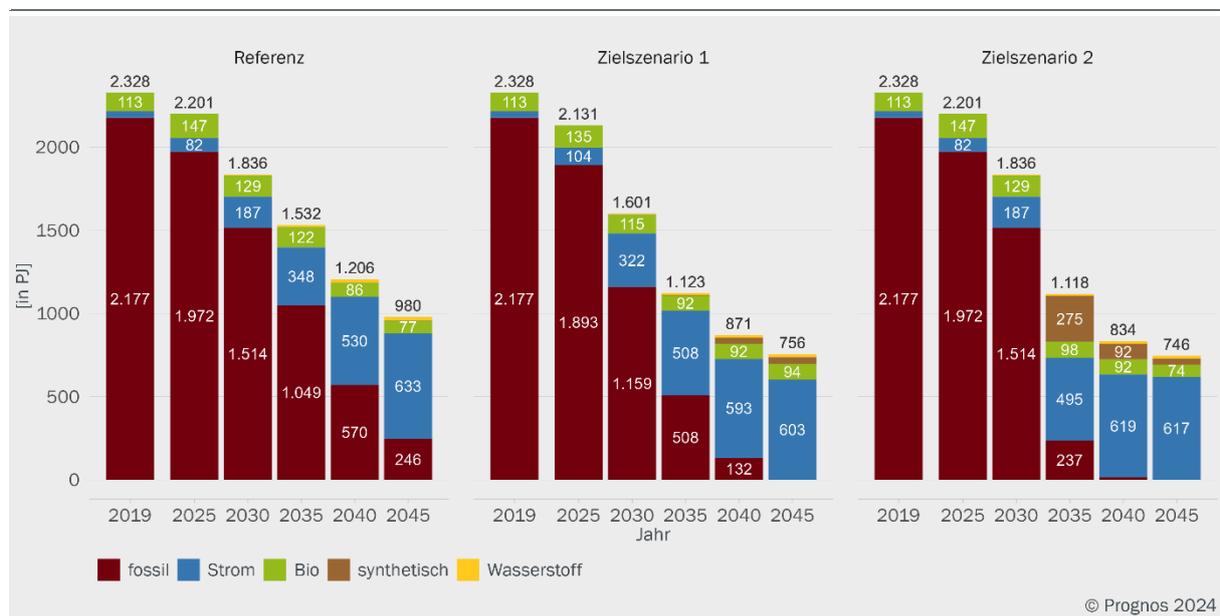
Biokraftstoffe und Strom haben bisher nur einen geringen Anteil am Energiemix des Verkehrs, obwohl ihre Bedeutung in den letzten Jahren deutlich zugenommen hat. Die zunehmende Elektrifizierung der Fahrzeuge bietet die Chance, den Energieverbrauch im Verkehr deutlich zu senken, da Elektromotoren einen deutlich höheren Wirkungsgrad als Verbrennungsmotoren aufweisen. Um den Endenergieverbrauch im Verkehr weiter zu senken und damit auch die Emissionen im Verkehr nachhaltig zu reduzieren, sind neben der Elektrifizierung weitere Effizienzsteigerungen der Fahrzeuge, der Ausbau des öffentlichen Verkehrs sowie die Entwicklung und Umsetzung von Mobilitätskonzepten, die die Abhängigkeit vom motorisierten Individualverkehr reduzieren, notwendig (UBA 2024a).

Der Endenergieverbrauch im inländischen Verkehr sinkt im Referenzszenario durch technologische und nachfrageseitige Veränderungen im Verkehrssektor von rund 2.328 Petajoule (PJ) im Jahr 2019 auf rund 1.000 PJ und in den beiden Zielszenarien zwischen 700 und 800 PJ im Jahr 2045. Gleichzeitig geht der Anteil fossiler Energieträger drastisch zurück. Im Basisjahr 2019 dominieren die fossilen Energieträger mit einem Anteil von 94 Prozent den Endenergieverbrauch im Verkehr deutlich. Fossile Energieträger decken hier also noch fast die gesamte Energienachfrage. Im Jahr 2045 hingegen werden in beiden Zielszenarien keine fossilen Energieträger mehr im Verkehrssektor eingesetzt.

Durch die Elektrifizierung des Straßenverkehrs steigt der Strombedarf, gleichzeitig sinkt der Verbrauch fossiler Kraftstoffe. Ab dem Jahr 2035 liegt der Strombedarf in Zielszenario 1 energetisch über dem Verbrauch fossiler Kraftstoffe. In Zielszenario 2 liegt dieser Schnittpunkt – getrieben durch das ab 2031 laufende Abwrackprogramm – bereits ein Jahr früher. Im Referenzszenario beträgt der Anteil fossiler Energieträger im Jahr 2045 noch immer 25 Prozent. Die Nutzung von Wasserstoff spielt in allen drei Szenarien im Jahr 2045 keine nennenswerte Rolle. Gleiches gilt für synthetische Kraftstoffe, die nur in Zielszenario 2 für einen gewissen Zeitraum in den 2030er-Jahren relevant sind. Um eine rasche Reduktion der THG-Emissionen im Verkehr zu erreichen, werden in diesem Zeitraum synthetische Kraftstoffe zu hohen Kosten eingesetzt (Abbildung 9).

Abbildung 9: Endenergieverbrauch im Inland nach Energieträger

Szenarien für die Jahre 2019 bis 2045, in PJ



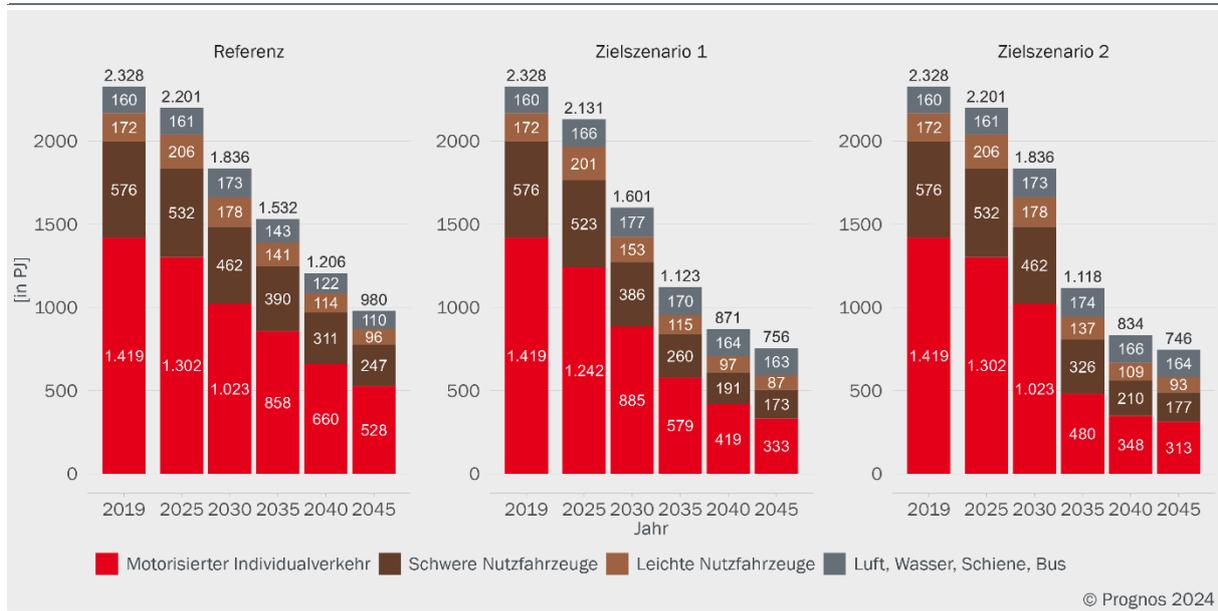
eigene Abbildung

In der Energiebilanz werden der jährliche Kraftstoffabsatz und der Energieverbrauch nach Sektoren und Verwendungszwecken beziehungsweise Verkehrsträger bilanziert. Mit über 60 Prozent hat der motorisierte Individualverkehr den größten Anteil am inländischen Verbrauch. Weitere wesentliche Anteile entfallen auf LNF und SNF. Der inländische Luftverkehr, die Binnenschifffahrt, der Eisenbahnverkehr und der Busverkehr hatten 2019 dagegen zusammengenommen nur einen Anteil von 7 Prozent am inländischen Energieverbrauch des Verkehrssektors.

Der Rückgang des Energieverbrauchs ist in allen Szenarien vor allem auf den bedingt durch die Antriebswende sinkenden Energieverbrauch im MIV zurückzuführen. Durch die deutlich schnellere Umsetzung der Antriebs- und Mobilitätswende in den beiden Zielszenarien sind hier die stärksten Reduktionen zu verzeichnen. Auch bei den LNF und SNF sind Einsparungen von über 50 Prozent zu verzeichnen. Dagegen ist in den beiden Zielszenarien im Luft-, Wasser-, Schienen- und Busverkehr kein Rückgang des Endenergieverbrauchs zu verzeichnen, was jeweils auf die stark steigende Nachfrage in ÖPNV, Schienenpersonenfernverkehr und Schienengüterverkehr zurückzuführen ist (Abbildung 10).

Abbildung 10: Endenergieverbrauch im Inland nach Verkehrsmitteln

Szenarien für die Jahre 2019 bis 2045, in PJ



eigene Abbildung

2.5 Emissionen

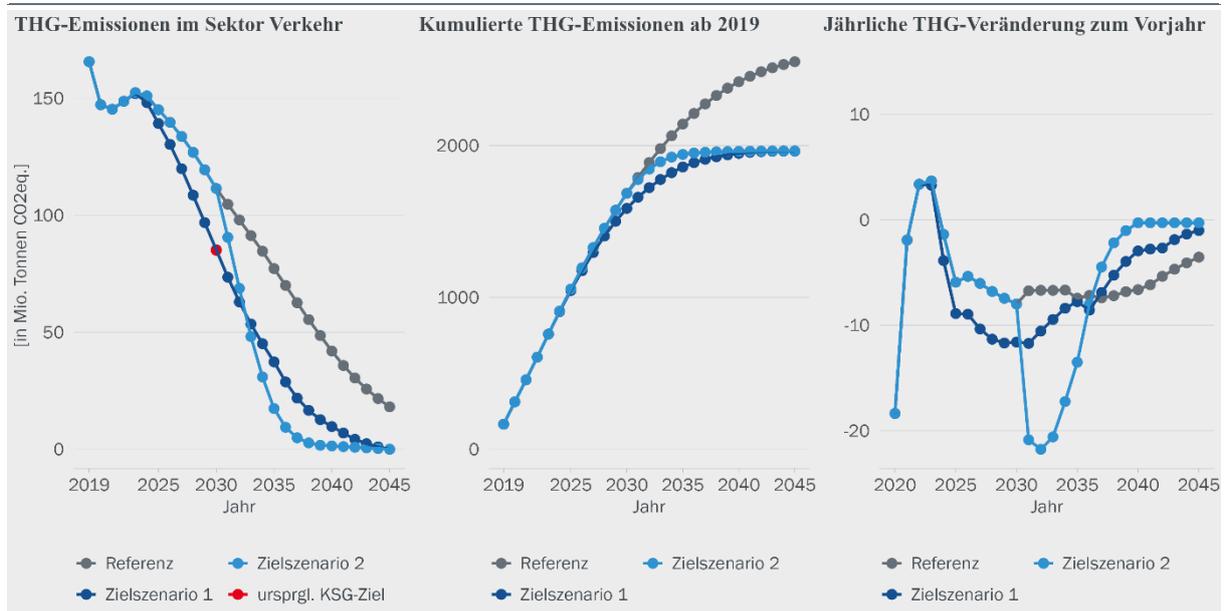
Das Ziel laut KSG von 85 Mt. CO₂eq im Jahr 2030 wird nur in Zielszenario 1 erreicht. In Anlehnung an das MWMS-Szenario (siehe Kapitel 2.1), werden die THG-Emissionen in den Szenarien Referenz und Ziel 2 ab 2025 deutlich reduziert. In den Szenarien Referenz und Ziel 1 setzt sich diese Entwicklung trendmäßig fort, während in Zielszenario 2 in den 2030er Jahren ein deutlich stärkerer Rückgang der Emissionen erforderlich ist, um 2045 Klimaneutralität zu erreichen und das THG-Budget des Zielszenarios 1 nicht zu überschreiten. Das Gesamtemissionsbudget für den Verkehrssektor von 1.650 Mt. CO₂eq im Zeitraum von 2021 bis 2045 wurde dabei folgendermaßen berechnet: Bis 2030 wurden die Sektorziele des Bundesklimaschutzgesetzes zugrunde gelegt; für die weiteren Jahre bis 2045 wurde angenommen, dass die zulässigen Emissionen im Verkehr proportional zu den sektorübergreifenden Emissionszielen weiter absinken.

In Zielszenario 1 liegen die kumulierten Emissionen im Jahr 2030 rund 100 Mt. CO₂eq oder 6 Prozent unter denen des Referenzszenarios. Nach 2030 steigen die kumulierten Emissionen in den Zielszenarien nur noch moderat an, während sie im Referenzszenario weiter ansteigen und erst in den späten 2040er Jahren abflachen.

Die verschiedenen Strategien zur CO₂-Minderung kommen in den einzelnen Szenarien unterschiedlich stark zum Tragen. In Zielszenario 1 führen eine frühzeitige Mobilitätswende im Personenverkehr, die Verlagerung des Güterverkehrs auf die Schiene und eine rasche Elektrifizierung der Fahrzeugflotten zu deutlichen und sofortigen Emissionsminderungen. Durch eine weitere Verlagerung auf klimafreundlichere Verkehrsträger, aber auch durch eine Erhöhung der Auslastung der Fahrzeuge – unter anderem durch Carsharing- und Pooling-Angebote – können weitere Emissionsminderungen erzielt werden. Ein weiterer Teil der notwendigen THG-Minderungen auf dem Weg zur Klimaneutralität wird durch die vollständige Elektrifizierung der Lkw-Flotte erbracht (Abbildung 11).

Abbildung 11: Treibhausgasemissionen nach Szenario

Szenarien für die Jahre 2019 beziehungsweise 2020 bis 2045, in Mt. CO₂eq



eigene Abbildung

Treibhausgas-Projektionen 2024

Die im März 2024 veröffentlichten Treibhausgas-Projektionen 2024 zeigen, dass das Ziel, die Treibhausgase bis 2030 um 65 Prozent gegenüber 1990 zu reduzieren, mit den aktuellen Maßnahmen fast erreicht werden kann. In der Summe können sogar die gemäß KSG sektorübergreifend zulässigen THG-Emissionen eingehalten und teilweise sogar übererfüllt werden. Damit unterstreichen die Projektionsdaten 2024 Fortschritte in der Klimapolitik im Vergleich zum *Projektionsbericht 2023*. Während die Sektoren Energiewirtschaft, Industrie, Landwirtschaft und Abfallwirtschaft ihre Ziele übererfüllen, werden diese jedoch in den Sektoren Verkehr und Gebäude erneut verfehlt.

Es besteht damit weiterhin die Möglichkeit, dass Deutschland seine Ziele gemäß der EU-Klimaschutzverordnung (*Effort Sharing Regulation, ESR*) nicht erfüllen kann. Insbesondere im Kontext der ESR-Ziele zeigt sich eine deutliche Diskrepanz von 126 Mt. CO₂eq bezogen auf den Zeitraum von 2021 bis 2030, mit den Sektoren Verkehr und Gebäude als wesentlichen Beitragsleistern. Die Notwendigkeit einer konsequenten Umsetzung und Weiterentwicklung der Klimapolitik zur Erreichung der Netto-Treibhausgas-Neutralität im Jahr 2045 bleibt damit weiterhin bestehen und stellt durchaus eine Herausforderung dar – denn die derzeitige Politik könnte dazu führen, dass die gesetzten Ziele möglicherweise nicht erreicht werden können (UBA 2024c).

3 Herleitung der Ausgaben und Kosten

3.1 Methodische und begriffliche Grundlagen

Basierend auf den Verkehrsszenarien werden in dieser Studie die jährlichen Ausgaben und Kosten berechnet. Die **Ausgaben** ergeben sich aus den Zahlungen der privaten und der öffentlichen Hand im jeweiligen Jahr. Für Investitionsgüter wie Fahrzeuge, Züge oder Lade- und Verkehrsinfrastruktur werden in dieser Studie sowohl Ausgaben als auch Kosten ausgewiesen. Die **Kosten** werden als **Annuitäten** berechnet, das heißt die Ausgaben für die Güter werden als jährliche Kosten (Annuitäten) über die Lebensdauer der Güter betrachtet. Bei den Investitionsgütern wird also zwischen Ausgaben und Kosten unterschieden, während bei den Kostenkategorien ohne Lebensdauer – Energiekosten, Personalkosten und Wartungskosten – nur die im jeweiligen Jahr anfallenden Kosten betrachtet werden.

Dabei werden die folgenden Kostenkategorien und Unterkategorien unterschieden:

Tabelle 2: Betrachtete Kostenkategorien

Kostenkategorie I	Kostenkategorie II	CapEx / OpEx
Infrastruktur	Straßeninfrastruktur	CapEx
	Schieneninfrastruktur	CapEx
	Ladeinfrastruktur	CapEx und OpEx
	Wasserstofftankstellen	CapEx und OpEx
Fahrzeuge / Züge	Investition in Fahrzeuge	CapEx
	Investition in Züge	CapEx
Energiekosten		OpEx
Personalkosten		OpEx
Wartungskosten		OpEx

| eigene Tabelle

Die Beschreibungen in diesem Kapitel orientieren sich an den unterschiedlichen Kostenkategorien und den betreffenden Verkehrsmitteln. Zunächst werden die jährlichen Ausgaben für den Untersuchungszeitraum von 2019 bis 2045 ermittelt. Wo möglich und zielführend, werden ausgehend von den Mengenentwicklungen der Verkehrsszenarien die Ausgaben je nach Kategorie

fortgeschrieben. Dabei wird je Kategorie ein spezifischer Ausgaben- beziehungsweise Kostensatz, etwa ein Kilometersatz [Euro/Fzgkm], berechnet, um anschließend die Ausgaben anhand der Verkehrsentwicklung fortzuschreiben. Die Vorgehensweise und die verwendeten Quellen und Grundlagen werden in den entsprechenden Unterabschnitten erläutert.

Die investiven Ausgaben (CapEx) für Infrastrukturen oder Fahrzeuge werden mit einem nominalen Zinssatz und einer spezifischen Lebensdauer in eine Annuität umgerechnet. Der angenommene nominale Zinssatz beträgt drei Prozent und die verwendeten Lebensdauern können der nachfolgenden Tabelle entnommen werden.

Tabelle 3: Angenommene Lebensdauer zur Berechnung der Kosten

Kostenkategorie	Verkehrsmittel	Lebensdauer in Jahren	Bemerkungen
Straßeninfrastruktur		35	Annahme: analog zu Schieneninfrastruktur gesetzt.
Schieneninfrastruktur		35	Auf Basis der AfA-Tabellen. Die Werte wurden jedoch nach oben korrigiert, da es sich bei AfA um eine steuerliche Abschreibung handelt und diese meist kürzer ausfällt als die Lebensdauer der Güter.
Ladeinfrastruktur		10	Quelle: (Swiss eMobility 2023)
Wasserstofftankstellen		10	Quelle: (IEA 2020)
Investition Fahrzeuge	Pkw	16	Aus Kohortenberechnung.
Investition Fahrzeuge	Straßengüterfahrzeuge	10	Aus Kohortenberechnung: Szm kürzer, LNF und leichte Lkw dafür länger.
Investition Fahrzeuge	Busse	14	Laufende Begleitforschung (pwc und Prognos AG et. al. 2024)
Investition Züge	Alle	30	Auf Basis der AfA-Tabellen. Die Werte wurden jedoch nach oben korrigiert, da es sich bei AfA um eine steuerliche Abschreibung handelt und diese meist kürzer ausfällt als die Lebensdauer der Güter.

| eigene Tabelle auf Basis verschiedener Quellen

Mit dieser Vorgehensweise werden alle relevanten gesamtwirtschaftlichen Ausgaben und Kosten innerhalb des Verkehrssektors erfasst. Die Berechnungen werden in erster Linie für den Straßen- und Schienenverkehr vorgenommen, nicht betrachtet wird der Luft- und Binnenschiffverkehr. Ausgenommen vom Straßenverkehr sind darüber hinaus Ausgaben und Kosten für die Infrastruktur des Fahrrad- oder Fußverkehrs. Es wurde angenommen, dass sich durch eine verringerte Verkehrsleistung im MIV Mehrkosten für den Fahrrad- und Fußverkehr durch nutzungsbedingte Einsparungen bei Investitionen in das niederrangige Straßennetz finanzieren lassen.

Die Ergebnisse zu den Ausgaben und Kosten werden für die Verkehrsträger Straße und Schiene sowie für den Personen- und Güterverkehr ausgewiesen. Die Zuordnung der Verkehrsmittel zu den Kategorien ist gemäß der folgenden Tabelle:

Tabelle 4: Zuordnung der Verkehrsmittel bei den Ausgaben und Kosten

	Verkehrsmittel
Straßenpersonenverkehr	Pkw und Busse
Straßengüterverkehr	Leichte Nutzfahrzeuge, Lkw und Sattelzugmaschinen
Schienenpersonenverkehr	Stadtbahnen, Schienenpersonennahverkehr und Schienenpersonenfernverkehr
Schienengüterverkehr	Schienengüterverkehr

| eigene Tabelle

3.2 Verkehrsinfrastruktur

Die Verkehrsinfrastruktur bildet das Fundament für alle Verkehrsangebote – auf Straße und Schiene, im individuellen und öffentlichen Verkehr. Damit sind Verkehrsinfrastrukturen elementar für die Daseinsvorsorge wie auch für die Attraktivität der Verkehrsmittel. Investitionen in die Verkehrsinfrastruktur sind entscheidend für die Entwicklung sowohl der Verkehrsmittelnutzung als auch der Nachfrage nach Verkehr. Beispielsweise kann der Ausbau von Straßen und Autobahnen den individuellen Pkw-Verkehr erhöhen. Investitionen in Schienen- oder Radinfrastruktur können dagegen den öffentlichen oder nicht-motorisierten Verkehr attraktiver machen.

Es ist zu beachten, dass Investitionen in Verkehrsinfrastrukturen erhebliche finanzielle Verpflichtungen darstellen und potenziell räumliche, ökologische und soziale Auswirkungen haben. Eine angemessene, zukunftsorientierte und umweltverträgliche Infrastrukturplanung ist daher essenziell für einen effizienten, umweltfreundlichen und sozial gerechten Verkehr.

3.2.1 Schieneninfrastruktur

In diesem Abschnitt werden die geplanten Investitionen des Bundes in die Schieneninfrastruktur analysiert. Wir berücksichtigen hierbei die Investitionspläne bis zum Jahr 2030 sowie zusätzliche Finanzierungszusagen aus dem vergangenen und dem laufenden Jahr, 2023 und 2024. Auf dieser Grundlage leiten wir die jährlichen Ausgaben für die Schieneninfrastruktur in verschiedenen Szenarien ab.

Infrastruktur für Schienenpersonennah- und -fernverkehr sowie Güterzüge

Bis 2030 waren Investitionen des Bundes in die Schieneninfrastruktur in Höhe von 63 Mrd. Euro vorgesehen (FAZ 2023). Im September vergangenen Jahres kündigte die Bundesregierung weitere 40 Mrd. Euro an, die in die Generalsanierung von insgesamt 40 Streckenabschnitten mit über 4.000 Kilometern Schienennetz fließen sollen (Bundesregierung 2023a; DB 2024). Tabelle 5 zeigt einen Überblick über die Anzahl und Länge dieser 40 Streckenabschnitte.

Für **Zielszenario 1** wird demzufolge mit Investitionen des Bundes in Höhe von (real) 103 Mrd. Euro bis 2030 gerechnet. Diese wurden anhand der geplanten Generalsanierungen und anhand von Zahlen aus dem Bundeshaushalt auf die Jahre 2024 bis 2030 verteilt (BMDV, Bundesschienenwege; Bundesministerium der Finanzen, 2024). Ab 2031 wurde ein kontinuierlicher Rückgang der jährlichen Investitionen auf real 9 Mrd. Euro angenommen. Die dem Bundeshaushalt entnommenen Zahlen sind in Tabelle 6 und Tabelle 7 aufgeführt.

Tabelle 5: Geplante Generalsanierungen von Bund und Deutscher Bahn bis 2030

	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Anzahl Streckenabschnitte	1	2	5	7	9	7	9
Gesamt-Kilometer	74	351	450	768	822	762	814

eigene Tabelle auf Basis (DB 2024)

Tabelle 6: Bundeshaushalt – Ausgaben in Mrd. Euro

BMDV – Bundesschienenwege

	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Ist (bis 2022)	6,14	6,29	7,54	11,08	9,94	-	-
Soll (ab 2023)	-	-	-	-	-	9,19	16,40

eigene Tabelle auf Basis (Bundesministerium der Finanzen 2024)

Tabelle 7: Bundeshaushalt – Verpflichtungsermächtigungen in Mrd. Euro

BMDV – Bundesschienenwege

	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Baukostenzuschüsse für Investitionen des Bedarfsplans Schiene	0,37	0,43	0,86	0,92	0,92	0,85

eigene Tabelle auf Basis (Bundesministerium der Finanzen 2024)

Für das **Referenzszenario** wird die Annahme getroffen, dass die 103 Mrd. Euro – welche eigentlich bis 2030 geplant sind – erst verzögert bis zum Jahr 2035 vollumfänglich investiert sein werden, unter anderem aufgrund des angespannten Finanzhaushaltes. Die Verteilung der 103 Mrd. Euro auf die einzelnen Jahre erfolgt anhand der jährlichen Anteile der Investitionen in Zielszenario 1 (siehe Abschnitt oberhalb der Tabellen). Nach 2035 wird ein kontinuierlicher Rückgang der jährlichen Investitionen auf real 7 Mrd. Euro im Jahr 2040 angenommen.

In **Zielszenario 2** werden gemäß Annahme bis 2030 gleich hohe Investitionsbeiträge wie im Referenzszenario getätigt. Nach 2030 wird auch in Zielszenario 2 verstärkt in die Schieneninfrastruktur investiert. Um bis 2040 den Ausbau der Schieneninfrastruktur auf dasselbe Niveau wie in Zielszenario 1 zu bringen, ist ein deutlicher Anstieg der Investitionen notwendig. Zwischen 2030

und 2040 werden folglich deutlich größere Beträge in die Schieneninfrastruktur getätigt als in Zielszenario 1. Ab 2041 sind die jährlichen Ausgaben in den beiden Zielszenarien dann wieder gleich hoch bei real 9 Mrd. Euro.

Aus den Zahlen der *Integrierten Berichte* der Deutschen Bahn (DB) lässt sich ableiten beziehungsweise schätzen, dass mit zusätzlich etwa 17 Prozent Eigeninvestitionen der Deutschen Bahn gerechnet werden kann (DB 2023). Dementsprechend werden die oben errechneten Werte mit dem Faktor 1,17 multipliziert (vergleiche Tabelle 8).

Tabelle 8: Investitionen DB Netze Fahrweg in Mio. Euro

	2018	2019	2020	2021	2022	01-06 22	01-06 23
Brutto-Investitionen	6.901	7.441	8.480	9.349	8.969	3.019	3.703
Netto-Investitionen	564	1.055	1.363	1.738	1.738	718	901
Anteil netto/brutto	7,5 %	12,4 %	13,8 %	15,7 %	16,2 %	19,2 %	19,6 %

| eigene Tabelle auf Basis (DB 2023)

Die Ausgaben für die Schieneninfrastruktur betreffen nicht nur bestimmte Verkehrswege, sondern die gesamte Schieneninfrastruktur. Um die Anteile für die einzelnen Verkehrsmittel zu ermitteln, werden die jährlichen Ausgaben auf die Verkehrswege Schienenpersonennahverkehr, Schienenpersonenfernverkehr und Schienengüterverkehr aufgeteilt.

Die Infrastrukturkosten für den Schienengüterverkehr basieren auf einer Studie von Roland Berger (Roland Berger und VDV 2021a). Demnach werden jährlich zwei bis drei Milliarden Euro in die Schieneninfrastruktur investiert, sowohl in den Ausbau als auch in die Digitalisierung, insbesondere in das European Train Control System (ETCS). Die Aufteilung der restlichen Ausgaben in die Schieneninfrastruktur werden zu 70 Prozent dem Schienenpersonenfernverkehr und zu 30 Prozent dem Schienenpersonennahverkehr zugewiesen. Aus den Informationen zur Sanierung der Schienenstrecken kann geschlussfolgert werden, dass die Investitionsbedarfe hauptsächlich den Schienenpersonenfernverkehr betreffen (DB 2024) – genauere Angaben zu den Anteilen von Fern- und Nahverkehr konnten nicht gefunden werden.

Infrastruktur für Stadtbahnen

Das Deutsche Institut für Urbanistik (Difu) hat den Investitionsbedarf für die kommunale Verkehrsinfrastruktur untersucht. Nach den Berechnungen des Difu ergibt sich für die kommunale ÖPNV-Infrastruktur ein normativer Nachholbedarf von gut 24 Mrd. Euro. Zusätzlich zum Nachholbedarf wird der Ersatzbedarf für den Zeitraum bis 2030 auf 55 Mrd. Euro geschätzt. Als dritte Kostenkomponente wird ein Erweiterungsbedarf in der Höhe von 4,5 Mrd. Euro angegeben. Sowohl beim Nachhol- als auch beim Ersatz- und Erweiterungsbedarf entfällt der größte Anteil auf U-Bahn- und Stadt-/Straßenbahnstrecken in Tunnellage. Ausschlaggebend hierfür sind vor allem die besonders hohen spezifischen Baukosten, die beispielsweise für den Ersatz oder zumindest die grundlegende Sanierung eines U-Bahntunnels anfallen (Difu 2023).

Auf Basis der Difu-Studie wird für den Zeitraum 2021 bis 2030 ein Nachhol- und Ersatzbedarf für Stadtbahnen von insgesamt 64 Mrd. Euro geschätzt. Für den weiteren Ausbau der Infrastruktur (U-Bahntunnel, Haltestellen etc.) werden für diesen Zeitraum weitere 4,4 Mrd. Euro kalkuliert (Difu 2023). Daraus ergibt sich ein jährlicher Investitionsbedarf von rund 6,9 Mrd. Euro für die kommunale Stadtbahninfrastruktur.

Aufbauend auf den Angaben der Difu-Studie wurden in dieser Studie die Infrastrukturkosten der Stadtbahnen auf Basis spezifischer Kosten pro Personenkilometer (Euro/Pkm) ermittelt und fortgeschrieben. Für den Zeitraum 2023 bis 2030 steigen die Ausgaben von rund 6,2 Mrd. Euro im Jahr 2023 auf rund 9,4 Mrd. Euro im Jahr 2030 in Zielszenario 1 und auf rund 8,6 Mrd. Euro (nominal) im Referenz- und Zielszenario 2. Nach 2030 sinkt die Verkehrsnachfrage bei den Stadtbahnen im Referenzszenario und damit auch die jährlichen Ausgaben auf rund 5,7 Mrd. Euro (nominal) im Jahr 2045.

Die Ergebnisse zu den Ausgaben- und Kostenberechnungen werden in Kapitel 3.2.3 dargestellt und beschrieben. Spezifisch die Werte zu den Stadtbahnen werden in Kapitel 4 in den Abbildungen zu den jährlichen Ausgaben und Kosten dargestellt.

3.2.2 Straßeninfrastruktur

Die Ausgaben für die Straßeninfrastruktur werden für die Straßenkategorien Bundesfernstraßen (BAB und Bundesstraßen), Landesstraßen, Kreisstraßen und kommunale Straßen einzeln berechnet. Dabei werden jeweils sowohl die jährlichen Ausgaben für die Instandhaltung oder den Ersatz bestehender Straßen als auch die Ausgaben für den Aus- oder Neubau von Straßen betrachtet. Bis zum Jahr 2030 entwickeln sich die Ausgaben in den Referenzszenarien und den Zielszenarien gleich. Ab dem Jahr 2031 gibt es Unterschiede, da in den Zielszenarien keine weiteren Investitionen in den Aus- oder Neubau von Bundesfernstraßen angenommen werden – dementsprechend fallen auch weniger Kosten für die Instandhaltung oder den Ersatz dieser Straßen an.

Die Berechnung der Ausgaben für Bundesfernstraßen basiert auf den Werten aus dem Bundesverkehrswegeplan 2016 und dem Wegekostengutachten des BMDV von 2021 (BMDV 2016; BMDV 2021a), die in folgender Tabelle dargestellt sind:

Tabelle 9: Ausgaben für Bundesfernstraßen (BAB und Bundesstraßen)

Kategorie	Einheit	Jahr	Wert
Sonstige Investitionen Straße	Mrd. Euro ₂₀₂₁	2021	0,80
Erhalt und Ersatz	Mrd. Euro ₂₀₂₁	2021	4,47
Aus- u. Neubau	Mrd. Euro ₂₀₂₁	2021	2,27
Aus- u. Neubau Schleppe	Mrd. Euro ₂₀₂₁	2021	1,31
Ausgaben Straße	Mrd. Euro ₂₀₂₁	2021	8,85

| eigene Berechnung der Jahreswerte auf Basis (BMDV 2016; BMDV 2021a)

Für die Berechnung der Ausgaben für kommunale Straßen wird, wie auch bei den Infrastrukturkosten für Stadtbahnen, auf die Difu-Studie zurückgegriffen (Difu 2023):

Tabelle 10: Ausgaben für kommunale Straßen

Kategorie	Einheit	Jahr	Wert
Nachhol- und Ersatzbedarf	Mrd. Euro ₂₀₂₁	2021	27,17
Erweiterungsbedarf	Mrd. Euro ₂₀₂₁	2021	1,83

| eigene Berechnung der Jahreswerte auf Basis (Difu 2023)

Die Berechnung der Ausgaben für Landes- und Kreisstraßen erfolgt basierend auf den Ergebnissen einer Studie der Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin (Böttger 2021):

Tabelle 11: Ausgaben für Landes- und Kreisstraßen

Kategorie	Einheit	Jahr	Wert
Kreisstraßen	Mrd. Euro ₂₀₂₁	2021	3,51
Kommunale Straßen	Mrd. Euro ₂₀₂₁	2021	19,34

| eigene Berechnung der Jahreswerte auf Basis (Böttger 2021)

Die Aufteilung der Straßeninfrastrukturkosten nach Verkehrszweigen (Pkw, Straßengüterfahrzeuge, Busse) basiert auf der Berechnung der Wegekosten für das Bundesfernstraßennetz sowie der Klimaschadenskosten nach Maßgabe der Richtlinie 1999/62/EG für die Jahre 2023 bis 2027 des BMDV (BMDV 2021a). Die Allokation der Straßeninfrastrukturkosten auf die einzelnen Verkehrsmittel ist sehr komplex. Beim Wegekostengutachten wird eine verursachergerechte Allokation auf Basis verschiedenster Kriterien vorgenommen. So wird beispielsweise die gewichtsabhängige Achslastäquivalenzziffer oder die Kapazitätsäquivalenzziffer der einzelnen Fahrzeugkategorien berücksichtigt. Dieser Allokationsschlüssel wird allerdings nur für das hochrangige Straßennetz (Bundesautobahnen und Bundesstraßen) berechnet. Im Rahmen dieser Untersuchung konnte kein komplexer Allokationsschlüssel für die restlichen Straßenkategorien berechnet werden, deshalb werden die Kosten gemäß dem Wegekostenschlüssel allokiert.

Infrastruktur für den Radverkehr

Die Investitionen in die Radverkehrsinfrastruktur in Deutschland sind im Vergleich zu den Investitionen in andere Infrastrukturelemente vergleichsweise niedrig. So wurden vom Bund 2023 bspw. 120 Mio. Euro in den Radwegebau an Bundesstraßen investiert. In Kombination mit Förder- und Finanzhilfeprogrammen wurden insgesamt rund 561 Mio. Euro der Haushaltsmittel für den Radverkehr ausgegeben (Bundesregierung 2023b). In Relation zu den Ausgaben für den Straßenbau ist diese Summe jedoch verschwindend gering, hier fließen jährlich mehrere Milliarden Euro.

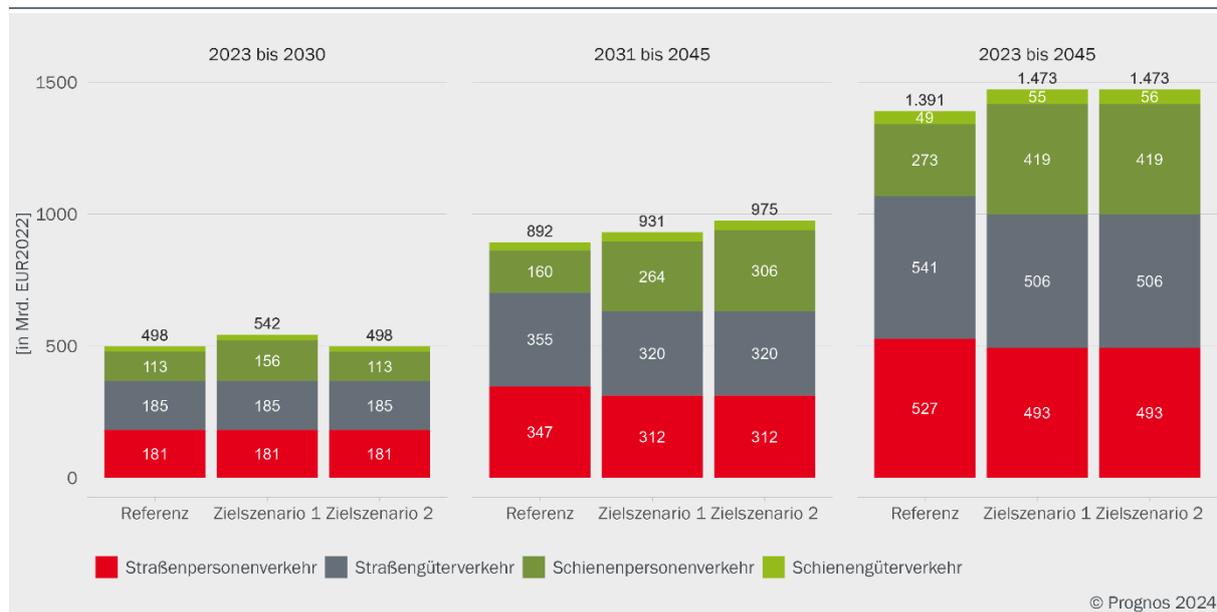
Auch im Radverkehr gilt jedoch der verkehrswissenschaftliche Grundsatz, dass Angebot Nachfrage schafft. Eine konsequente Strategie zur Verbesserung der Radinfrastruktur könnte somit den Radverkehrsanteil erheblich erhöhen. Zur Umsetzung der im *Nationalen Radverkehrsplan 2030* angestrebten Maßnahmen und für die Erfüllung der Klimaziele ist dies unerlässlich. Investitionen in die Radverkehrsinfrastruktur können hierfür als entscheidender Baustein angesehen werden (BMDV 2021b). Ein gezielter Ausbau bietet auch einen bedeutenden Mehrwert in Hinblick auf Sicherheit und Gesundheit der Bevölkerung, denn insgesamt generiert das Radfahren einen gesellschaftlichen Mehrwert von ungefähr 18 Euro pro 100 Kilometer (Gössling et al. 2019; Europäische Kommission DG Move 2020). Im Rahmen dieser Studie wurden die Kosten für die Radverkehrsinfrastruktur nicht explizit modelliert. Grund hierfür sind, wie bereits in Kapitel 3.1 beschrieben, die in Relation zu den Kosten für die Straßen- und Schieneninfrastruktur deutlich niedrigeren Investitionssummen. Es wird angenommen, dass im niederrangigen Straßennetz (unterhalb der Bundesstraßen) durch eine geringere Nutzungsintensität weniger Investitionen notwendig sein werden und dadurch Finanzierungsspielräume in ausreichendem Umfang für Investitionen in die Radverkehrsinfrastruktur entstehen.

3.2.3 Ergebnisse: Ausgaben und Kosten der Verkehrsinfrastruktur

In Abbildung 12 werden die jährlichen Investitionen für die Schienen- und Straßeninfrastruktur im Personen- und Güterverkehr für drei Zeiträume kumuliert dargestellt. Zwischen 2023 und 2030 sind die realen Ausgaben für die Verkehrsinfrastruktur in Zielszenario 1 am höchsten und im Referenzszenario sowie in Zielszenario 2 gleich hoch. Dies ändert sich zwischen 2031 und 2045. Nach 2030 ist das Zielszenario 2 das teuerste, da gemäß Annahme bis 2040 die Investitionen des Zielszenarios 1 aufgeholt werden. Im Referenzszenario kommt es erneut zu den geringsten Ausgaben im Szenarienvergleich. Über den gesamten Zeitraum betrachtet sind die Ausgaben für die Verkehrsinfrastruktur in den beiden Zielszenarien gleich hoch, was unter anderem darauf zurückzuführen ist, dass sich hier der Diskontierungssatz und die angenommene Preissteigerung ausgleichen. Im Referenzszenario liegen die Infrastrukturausgaben der Straße insgesamt rund 7 Prozent höher als in den Zielszenarien. Grund hierfür ist die Annahme, dass in den Zielszenarien nach 2030 kein weiterer Ausbau der Straßeninfrastruktur mehr vorgenommen wird, sondern nur noch die Ausgaben für Instandhaltung oder Ersatz anfallen. Um die Verlagerungsziele in Zielszenario 1 zu schaffen, sind bis 2030 höhere Investitionen in die Schieneninfrastruktur notwendig: Die Investitionen in die Schieneninfrastruktur liegen rund ein Drittel höher als in den Szenarien Referenz und Ziel 2. Die Ausgaben für die Straßeninfrastruktur bleiben in allen Szenarien dominant.

Abbildung 12: Infrastruktur – Ausgaben kumuliert nach Verkehrsmittel

Kumulierte reale Ausgaben für die Zeiträume 2023 bis 2030, 2031 bis 2045 und 2023 bis 2045



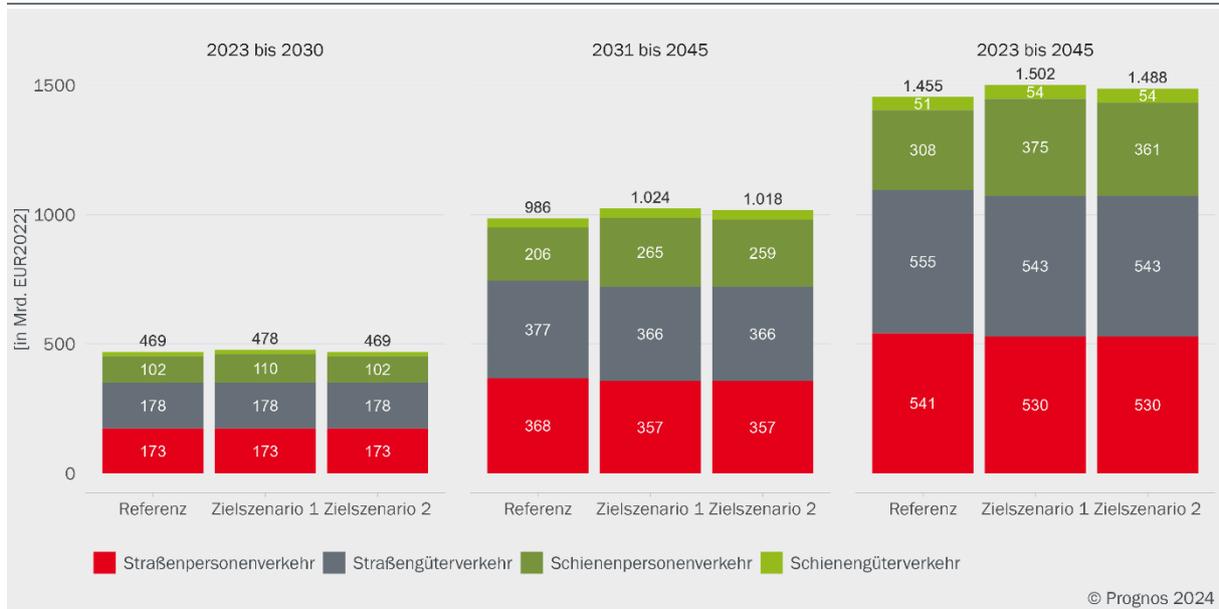
eigene Abbildung

Die Kosten für die Straßen- und Schieneninfrastruktur werden anhand der jährlichen Ausgaben, eines nominalen Zinssatzes von 3 Prozent und einer angenommenen Lebensdauer von 35 Jahren berechnet. Im Zeitraum bis 2045 sind die Kosten für die Verkehrsinfrastruktur in Zielszenario 2 um etwa 1 Prozent höher als im Referenzszenario. Im Vergleich zu Zielszenario 1 sind die Infrastrukturkosten in Zielszenario 2 jedoch niedriger, obwohl die kumulierten Ausgaben im Betrachtungszeitraum gleich hoch sind (Abbildung 12 und Abbildung 13). Dies liegt daran, dass in

Zielszenario 2 der Investitionsschub in die Schieneninfrastruktur später erfolgt und somit im Betrachtungszeitraum weniger Kapital abgeschrieben wird.

Abbildung 13: Infrastruktur – Kosten kumuliert nach Verkehrsmittel

Kumulierte Kosten für die Zeiträume 2023 bis 2030, 2031 bis 2045 und 2023 bis 2045



eigene Abbildung

3.3 Ladeinfrastruktur

Die Ladeinfrastruktur ist eine wesentliche Voraussetzung für den Hochlauf batterieelektrischer Fahrzeugantriebe bei Pkw, Straßengüterfahrzeugen und Bussen. Je nach Fahrzeugtyp und Anwendung werden unterschiedliche Ladetechnologien und eine unterschiedliche Anzahl an Ladepunkten für den Betrieb benötigt. Zur Modellierung des Mengengerüsts wird in den folgenden Unterkapiteln die Anzahl der Ladepunkte nach Ladetechnologie für Pkw, Straßengüterfahrzeuge und Busse fortgeschrieben. Die Mengengerüste werden danach mit den Preisentwicklungen der entsprechenden Technologien verknüpft, woraus sich die jährlichen Ausgaben und schließlich die Kosten für die Ladeinfrastruktur berechnen.

Die den Berechnungen zugrunde liegenden Annahmen für die Ausgaben pro Ladepunkt sind einer Studie von Agora Verkehrswende entnommen und setzen sich differenziert nach Ladepunkttypen aus Ladeinfrastruktur- und Netzanschlusskosten zusammen (Agora Verkehrswende 2022). Die für 2019 angenommenen Werte wurden mittels eines Degressionsfaktors fortgeschrieben (zur weiteren Beschreibung der Kostendegression siehe letzter Absatz in Kapitel 3.3.1).

Tabelle 12: Ausgaben pro Ladepunkt

nach Typ und Ladeleistung in Euro₂₀₁₉

Typ	Ladeleistung	2019
Privat	Wohnort 11 kW	4.500
	Arbeitsplatz 22 kW	7.000
Öffentlich	22 kW	7.000
	150 kW	80.000
	350 kW	190.000
	Megawatt Charging System (MCS)	1.000.000
	22 kW	7.000
Depot	100 kW	60.000
	150 kW	80.000

| eigene Tabelle auf Basis eigener Berechnungen und (Agora Verkehrswende 2022)

Durch das in diesem Kapitel beschriebene Vorgehen ergeben sich nach Szenario differenzierte Mengengerüste für die Ladeinfrastruktur und die jeweiligen Ladetechnologien. Tabelle 13 zeigt die zeitliche Entwicklung des Bestands der Ladetechnologien in ausgewählten Jahren. Dieser wird mit den spezifischen Kostenannahmen verknüpft, woraus sich die jährlichen Ausgaben für die jeweilige Ladeinfrastruktur ergeben.

Tabelle 13: Ladeinfrastruktur nach Typ und Szenario in ausgewählten Jahren

Anzahl Ladepunkte (in Tausend)

Typ	Szenario	2019	2025	2030	2035	2045
Privat [Wohnort, 11 kW + Arbeitsplatz, 22 kW]	Referenz	83,2	2.096	6.992	15.600	31.609
	Ziel 1	83,2	2.963	11.682	18.806	23.717
	Ziel 2	83,2	2.096	6.992	22.956	26.735
Öffentlich [in vier Leistungsklassen 22 kW, 150 kW, 350 kW und MCS erfasst]	Referenz	19,6	138	388	470	635
	Ziel 1	19,6	193	452	500	546
	Ziel 2	19,6	138	387	512	583
Depot [für Straßengüterfahrzeuge und Busse mit 100 kW und 150 kW angenommen]	Referenz	17,8	171	1.016	2.391	4.483
	Ziel 1	17,8	226	1.591	3.170	4.954
	Ziel 2	17,8	171	1.016	2.502	4.709
Wasserstofftankstellen	Referenz	0,1	0,2	0,8	2,1	3,9
	Ziel 1	0,1	0,2	0,8	2,1	3,8
	Ziel 2	0,1	0,2	0,8	2,1	3,8

| eigene Tabelle auf Basis eigener Berechnungen und (Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur 2020; BFE 2023; BNetzA 2024)

3.3.1 Pkw

Für Pkw wird zwischen privater und öffentlicher Ladeinfrastruktur unterschieden. Die private Ladeinfrastruktur umfasst alle Ladepunkte, die von Privatpersonen für den Eigenbedarf errichtet werden, sowie Ladepunkte, die von Arbeitgebenden errichtet und Arbeitnehmenden zur Verfügung gestellt werden. Die öffentliche Ladeinfrastruktur umfasst alle Ladepunkte, die der Öffentlichkeit zur Nutzung zur Verfügung stehen.

Die Unterscheidung der verschiedenen Ladetechnologien der Pkw-Ladeinfrastruktur basiert auf Angaben der Nationalen Leitstelle Ladeinfrastruktur (Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur 2020). Die Berechnungen zur privaten Pkw-Ladeinfrastruktur unterliegen der Annahme, dass Ladepunkte in Wohngebäuden über 11 Kilowatt (kW) Ladeleistung verfügen, während die von Betrieben zur Verfügung gestellten Ladepunkte einer Konfiguration mit 22 kW entsprechen. Somit verfügt die private Ladeinfrastruktur über keine Schnelllader. In der öffentlichen Pkw-Ladeinfrastruktur wird zwischen Normalladern mit 22 kW Ladeleistung, die beispielsweise im öffentlichen Straßenraum oder auf Kundenparkplätzen angeboten werden, und den Schnellladern unterschieden. Bei Letzteren wird wiederum zwischen High-Power-Charging-Ladehubs (HPC-Ladehubs) mit 150 kW Leistung und Ladehubs an wichtigen Verkehrsachsen mit 350 kW Leistung differenziert.

Tabelle 14: Angenommene Ladeleistungen der Pkw-Ladeinfrastruktur

Typ	Kategorie	Ladeleistung (in kW)
Privat	Normallader (Wallbox – privat)	11
	Normallader (Arbeitsplatz)	22
Öffentlich	Normallader (öffentlich)	22
	Schnellader (HPC-Ladehubs)	150
	Schnellader (HPC-Ladehubs)	350

| eigene Tabelle auf Basis (Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur 2020)

Daten des aktuellen Ladesäulenregisters bilden die Grundlage für die Bestimmung der Ex-post-Werte des öffentlichen Ladeinfrastrukturmengengerüsts für die Jahre 2018 bis 2023 (BNetzA 2024). Zur Modellierung werden die Leistungsklassen der Ladepunkte im Ladesäulenregister auf die oben beschriebene Einteilung alloziiert. Die Berechnungen zur privaten Ladeinfrastruktur basieren auf der Annahme, dass im Ex-post-Zeitraum 2018 bis 2023 alle BEV über einen privaten Ladepunkt (Wohnort oder Arbeitsplatz) verfügt haben. Die Aufteilung zwischen privaten Ladepunkten am Wohnort und am Arbeitsplatz beträgt gemäß Daten der Nationalen Leitstelle Ladeinfrastruktur ungefähr 73 Prozent zu 27 Prozent für das Jahr 2030 (Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur 2020). Dieses Verhältnis wird im Rahmen dieser Untersuchung für den gesamten Betrachtungszeitraum angenommen.

Nach 2023 nimmt der Anteil der BEV, die über einen privaten Ladepunkt verfügen, sukzessive ab. Die *Early-Adopter* der Elektromobilität sind oftmals kaufkraftstarke Haushalte mit tendenziell guten Voraussetzungen zur Installation einer privaten Lademöglichkeit. Es wird unterstellt, dass der Anteil der BEV-Nutzenden, die Zugang zu privaten Ladepunkten haben, im Referenzszenario bis 2030 auf 82 Prozent und bis 2045 auf 70 Prozent sinkt. Die Interpolation dieses Anteils zwischen den Stützjahren erfolgt über einen Fit mittels Potenzfunktion in Abhängigkeit zur Anzahl BEV.

Bei den Anteilen der öffentlichen Ladetechnologien wird linear zwischen den Ex-post-Anteilen 2023 und denjenigen des Szenarios „HPC-Laden“ der Nationalen Leitstelle Ladeinfrastruktur interpoliert (Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur 2020). Ein Ziel innerhalb dieses Szenarios ist es, durch einen gezielten Ausbau der Schnellladeinfrastruktur, mit der in kürzerer Zeit mehr Fahrzeuge geladen werden können, die absolute Anzahl benötigter Ladepunkte zu reduzieren. Da zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Studie keine passenden Abschätzungen für die Entwicklung der Ladeinfrastruktur in Deutschland für die Jahre nach 2030 vorhanden waren, basiert die Fortschreibung der Anteile auf den Zahlen einer aktuellen Studie des Bundesamts für Energie der Schweiz (BFE 2023). Auf Basis des Szenarios „Ladewelt geplant“ werden die Anteile der

öffentlichen Ladetechnologien in einem ersten Schritt bis 2035 und schließlich bis 2045 linear fortgeschrieben. Über den Betrachtungszeitraum nehmen folglich die Anteile der Schnelllader von 9,2 Prozent im Jahr 2023 auf 22,6 Prozent im Jahr 2045 zu.

Die Entwicklung der Anzahl öffentlicher Ladepunkte wird bis zum Jahr 2030 wiederum an die Resultate der Studie der Nationalen Leitstelle Ladeinfrastruktur angelehnt (Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur 2020). Die Summe öffentlicher Ladepunkte wird basierend auf dem BEV-Bestand skaliert, da BEV-Pkw die relevantesten Verbraucher darstellen und – im Gegensatz zu Hybrid-Fahrzeugen – alternativlos auf Ladeinfrastruktur angewiesen sind. Für die Jahre 2031 bis 2045 erfolgt die Skalierung auf Basis der in der Studie des BFE, Szenario „Ladewelt geplant“, berechneten Entwicklung der öffentlichen Ladeleistung pro BEV (BFE 2023). Es wird angenommen, dass die für die Schweiz modellierten Werte eine angemessene Annäherung für die Entwicklung in Deutschland darstellen. Zur Fortschreibung des Ausbaus der öffentlichen Ladeinfrastruktur wird die öffentliche Leistung pro BEV mit der Entwicklung des BEV-Bestands in drei Stützjahren (2023, 2030 und 2045) des Referenzszenarios verknüpft. Zwischen den Stützjahren wird mittels einer logarithmischen Funktion interpoliert. In den Zielszenarien wird die gleiche spezifische öffentlichen Ladeleistung (pro BEV-Pkw) angenommen, wie im Referenzszenario. Die Anzahl der Ladepunkte und die Anteile der Ladetechnologien werden schließlich über die Summe der Ladeleistung und die in Tabelle 15 dargestellte Anteilsentwicklung errechnet.

Tabelle 15: Anteile Ladeklassen an öffentlichen Ladestellen

Jahr	22 kW	150 kW	350kW
2019	99 %	0 %	1 %
2030	88 %	7 %	4 %
2035	81 %	10 %	9 %
2040	79 %	11 %	9 %
2045	77 %	12 %	10 %

| eigene Tabelle auf Basis (Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur 2020; BFE 2023; BNetzA 2024)

Für alle Ladetechnologien wird eine Lebensdauer von zehn Jahren angesetzt. Bei einem rückläufigen Bedarf an Ladeinfrastruktur werden im jeweiligen Jahr folglich weniger Ladepunkte ersetzt, als zum Erhalt des Bestands notwendig wären.

Die jährlichen Ausgaben für die Ladeinfrastruktur setzen sich zusammen aus CapEx für den Neu- und Ersatzbau sowie den jährlichen OpEx als Anteil der CapEx. Bei den Anschaffungskosten für einzelne Ladepunkte wird nach Ladetechnologie unterschieden. Für Ladetechnologien bis 22 kW wird davon ausgegangen, dass die Anschaffungskosten während des Betrachtungszeitraums real konstant auf dem gleichen Niveau bleiben. Bei den Schnellladern (150 kW, 350 kW) wird bis zum Jahr 2030 eine Degression auf 80 Prozent der Anschaffungskosten des Jahres 2023 angenommen. Danach bleiben die Anschaffungskosten ebenfalls real konstant. Beim Ersatz von Ladepunkten werden für Normallader 40 Prozent und für Schnelllader 50 Prozent der Anschaffungskosten angesetzt, da beispielsweise Investitionen in den Netzanschluss bei einem gleichwertigen

Ersatz generell nicht noch einmal getätigt werden müssen. Die jährlichen OpEx errechnen sich auf Basis eines statischen Prozentsatzes der Neubau-CapEx für die jeweilige Ladetechnologie. Je höher die Ladeleistung, desto höher fallen die OpEx und somit dieser Prozentsatz aus.

3.3.2 Straßengüterverkehr und Busse

Bei den batterieelektrischen Straßengüterfahrzeugen wird, wie bei den Pkw, zwischen privater und öffentlicher Ladeinfrastruktur unterschieden, während die batterieelektrischen Busse ausschließlich über die private Infrastruktur des Betriebs geladen werden. Für die Straßengüterfahrzeuge wird basierend auf der Größenkategorie des Fahrzeugs eine Ladeleistungsklasse des Ladepunkts zugeordnet. Für die meisten Betreiber von Straßengüterverkehrsflotten lohnt es sich finanziell, die Ladeinfrastruktur selbst zur Verfügung zu stellen, anstatt auf öffentliche Ladeinfrastruktur mit höheren Tarifen und niedrigerer Verfügbarkeit zurückzugreifen. Folglich unterliegen die Berechnungen der Annahme, dass alle Straßengüterfahrzeuge über einen Depotladepunkt verfügen. Auch bei den Bussen wird entsprechend von einem Depotladepunkt pro batterieelektrischem Fahrzeug ausgegangen.

Die Leistungen der privaten Depotladepunkte für Straßengüterfahrzeuge und Busse sind in Tabelle 16 dargestellt.

Tabelle 16: Angenommene Ladeleistungen bei Depotladepunkten

	Leichte Nutzfahrzeuge	kleine und mittlere Lkw	Lkw ab 26 t und Sattelzugmaschinen	Busse
Ladeleistung in kW	22	100	150	100

| eigene Tabelle

Die Lkw-Größenklasse „26 t +“ und die Sattelzugmaschinen sind die einzigen Kategorien, für die auch ein Ausbau der öffentlichen Ladeinfrastruktur unterstellt wird. Laut einem Diskussionspapier des Fraunhofer ISI wird für ein langfristiges Gesamtsystem mit 100 Prozent batterieelektrischen Straßengüterfahrzeugen auf Bundesautobahnen (BAB) alle 25 Kilometer eine Megawatt-Charger-Möglichkeit benötigt (Fraunhofer ISI et al. 2021). Das ergibt ungefähr 500 Standorte entlang der BAB mit durchschnittlich 24 MCS-Ladepunkten (Fraunhofer ISI et al. 2021) pro Standort. In Summe sind somit rund 12.000 MCS-Ladepunkte für ein langfristiges Ladeinfrastruktursystem nötig. Diese Anforderung wird in erster Linie von schweren Langstreckenfahrzeugen getrieben.

Der Zielzustand, wie er in der Studie des Fraunhofer ISI dargestellt wird, entspricht in der Modellierung dem Stand im Jahr 2045 für alle betrachteten Szenarien (Fraunhofer ISI et al. 2021). Der Ausbau des Systems in Richtung dieses Zustands hängt eng mit der Entwicklung des Elektro-Lkw-Bestands zusammen. In Zielszenario 1 erfolgt die Elektrifizierung deutlich schneller als in den beiden anderen Szenarien, was einen beschleunigten Ausbau der Ladeinfrastruktur erfordert und somit höhere Investitionen in diesem Zeitraum bedingt.

Für alle Ladetechnologien wird eine Lebensdauer von zehn Jahren angesetzt, nach der die Anlage ersetzt werden muss. Bei einem rückläufigen Bedarf an Ladeinfrastruktur werden im jeweiligen Jahr folglich weniger Ladepunkte ersetzt, als zum Erhalt des Bestands notwendig wären.

Durch das oben beschriebene Vorgehen ergeben sich nach Szenario differenzierte Mengengerüste für die Ladeinfrastruktur und die jeweiligen Ladetechnologien. Diese werden im folgenden Schritt mit Kostenannahmen verknüpft, woraus sich die jährlichen Ausgaben für die Lkw- und Bus-Ladeinfrastruktur errechnen.

Die jährlichen Ausgaben für die Ladeinfrastruktur setzen sich zusammen aus CapEx für den Neu- und Ersatzbau sowie aus fixen jährliche OpEx als Anteil der CapEx. Bei den Anschaffungskosten für einzelne Ladepunkte wird nach Ladetechnologie unterschieden. Für Ladetechnologien bis 22 kW wird davon ausgegangen, dass die Anschaffungskosten während des Betrachtungszeitraums real konstant auf dem gleichen Niveau bleiben. Bei den Schnellladern mit 100 kW oder 150 kW Leistung wird bis zum Jahr 2030 eine Degression auf 80 Prozent der Anschaffungskosten des Jahres 2023 angenommen. Danach bleiben die Anschaffungskosten ebenfalls real konstant. Im Falle der MCS wird eine stärkere Degression unterstellt, da sich die Technologie derzeit noch nicht in Serienreife befindet. Die Anschaffungskosten aus dem Jahr 2023 werden folglich bis 2035 auf 40 Prozent gesenkt. Beim Ersatz von Ladepunkten werden für Normallader 40 Prozent, für Schnelllader (100 kW, 150 kW) 50 Prozent und für MCS 60 Prozent der Anschaffungskosten angesetzt, da beispielsweise Investitionen in den Netzanschluss bei einem gleichwertigen Ersatz generell nicht noch einmal getätigt werden müssen. Die jährlichen OpEx errechnen sich auf Basis eines statischen Prozentsatzes der Neubau-CapEx für die jeweilige Ladetechnologie. Je höher die Ladeleistung, desto komplexer die Technologie, und je komplexer die Technologie, desto höher der Anteil für die OpEx. Dieser Zusammenhang zeigt sich unter anderem in einer Studie der Ludwig-Bölkow-Stiftung (Ludwig-Bölkow-Stiftung und ADAC Stiftung 2019).

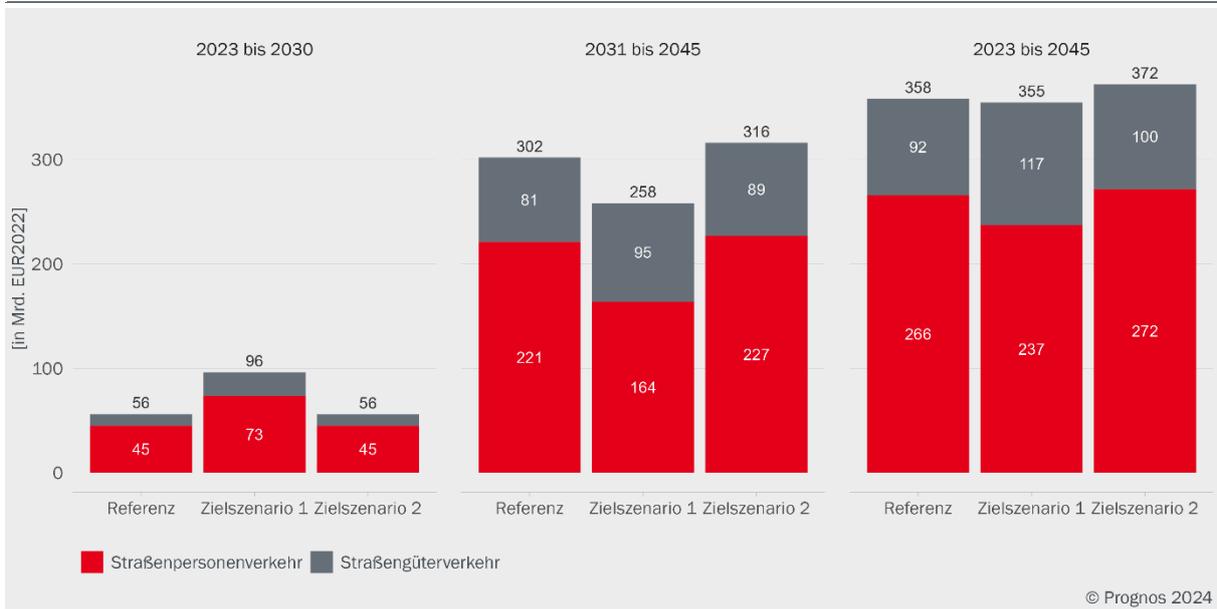
3.3.3 Ergebnisse: Ausgaben und Kosten der Ladeinfrastruktur

Abbildung 14 zeigt die kumulierten realen Gesamtausgaben für die Ladeinfrastruktur im Straßenpersonen- und -güterverkehr in drei Zeiträumen. Zwischen 2023 und 2030 wird in Zielszenario 1 deutlich mehr in die Ladeinfrastruktur investiert als in den beiden anderen Szenarien. Zwischen 2031 und 2045 sind die Ausgaben im Referenzszenario und in Zielszenario 1 gegenüber dem Zielszenario 2 niedriger, wobei der Unterschied zu Zielszenario 1 durchaus erheblich ist und am höchsten ausfällt. Über den gesamten Zeitraum betrachtet liegen die Gesamtausgaben für die Ladeinfrastruktur im Referenzszenario und in Zielszenario 1 auf einem ähnlichen Niveau, in Zielszenario 2 sind sie jedoch über 14 beziehungsweise 17 Mrd. Euro höher als in den beiden anderen Szenarien.

In allen drei Szenarien entfallen etwa zwei Drittel der Ausgaben auf die Ladeinfrastruktur für den Straßenpersonenverkehr (Pkw und Busse). Aufgrund der frühen und starken Elektrifizierung beim Straßengüterverkehr wird in Zielszenario 1 relativ und absolut gesehen zwischen 2023 und 2045 am meisten für die Ladeinfrastruktur investiert.

Abbildung 14: Ladeinfrastruktur – Ausgaben kumuliert nach Verkehrsmittel

Kumulierte reale Ausgaben für die Zeiträume 2023 bis 2030, 2031 bis 2045 und 2023 bis 2045



eigene Abbildung

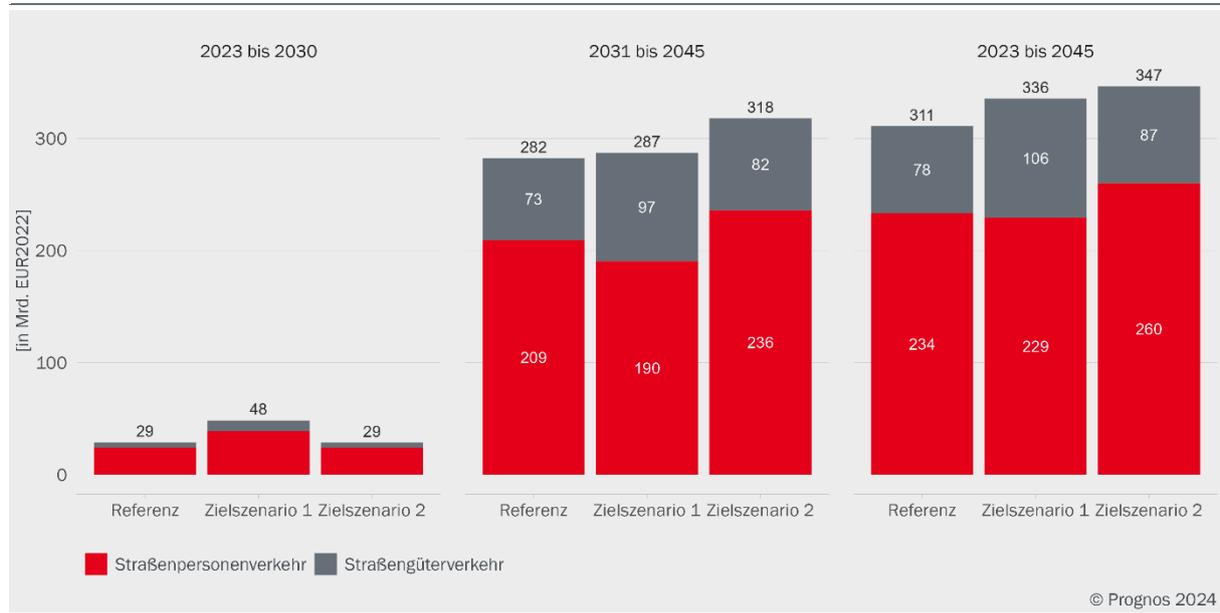
Abbildung 15 zeigt die kumulierten Gesamtkosten für die Ladeinfrastruktur differenziert nach Straßenpersonen und -güterverkehr in drei Zeiträumen. Hier zeichnet sich vor allem im Gesamt-betrachtungszeitraum ein etwas anderes Bild als bei den realen Gesamtausgaben. Die Ausgaben für die Ladeinfrastruktur werden über einen Zeitraum von 10 Jahren annuisiert. Im Referenzszenario erfolgt die Elektrifizierung der Fahrzeugflotte erst später und damit auch die Investitionen in die Ladeinfrastruktur. Diese ist damit verglichen mit den Zielszenarien im Untersuchungszeitraum noch zu kleineren Teilen abgeschrieben und deshalb bei den Kosten günstiger.

Zunächst sind zwischen 2023 und 2030 die Kosten im Referenzszenario und Zielszenario 2 gleich hoch und gegenüber dem Zielszenario 1 deutlich niedriger. Zwischen 2031 und 2045 dagegen liegen die Kosten im Referenzszenario und Zielszenario 1 auf einem ähnlichen Niveau, dagegen fallen in Zielszenario 2 in diesem Zeitraum deutlich mehr Kosten an. Über den gesamten Zeitraum betrachtet sind die Kosten für die Ladeinfrastruktur in Zielszenario 2 klar am höchsten, im Referenzszenario sind die Kosten insgesamt am niedrigsten.

In allen drei Szenarien entfallen über den gesamten Zeitraum etwa zwei Drittel der Kosten auf die Ladeinfrastruktur für Pkw und Busse, wobei dieser Anteil in Zielszenario 1 im Vergleich zu den anderen Szenarien analog zu den realen Ausgaben am niedrigsten ist. Aufgrund der stärkeren Elektrifizierung beim Straßengüterverkehr ist in Zielszenario 1 mit höheren Ausgaben und damit auch höheren Kosten für die Ladeinfrastruktur zu rechnen.

Abbildung 15: Ladeinfrastruktur – Kosten kumuliert nach Verkehrsmittel

Kumulierte Kosten für die Zeiträume 2023 bis 2030, 2031 bis 2045 und 2023 bis 2045



eigene Abbildung

3.4 Wasserstofftankstellen

Die Wasserstofftankstellen (*Hydrogen Refueling Stations (HRS)*) ermöglichen Brennstoffzellenfahrzeugen das Betanken mit Wasserstoff. Im Rahmen der Modellierung wird nicht nach Betankungstechnologien wie Druckniveaus und Flüssigbetankung unterschieden. Für alle Pkw, Straßengüterfahrzeuge und Busse wird eine generische HRS mit per Trailern angelieferten Wasserstoff unterstellt. Grundlage für die Modellierung des Mengengerüsts stellen die Ex-post-Werte des öffentlichen HRS-Netzes bis 2023 dar, die online bei H2 Mobility abgerufen werden können (H2 Mobility 2023). Für den Ausbau des öffentlichen HRS-Netzes bis 2030 wird, basierend auf der Verordnung über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe (AFIR) angenommen, dass 109 HRS in Deutschland bestehen werden – unabhängig vom gewählten Szenario (Europäisches Parlament und Europäischer Rat 2023). Anschließend wird der Ausbau je Szenario entsprechend dem jeweiligen Verhältnis von Brennstoffzellen-Fahrzeugen pro HRS des Jahres 2030 fortgeschrieben.

Für Straßengüterfahrzeuge und Busse wird zudem von privaten HRS ausgegangen. Bei den Lkw mit Gesamtgewicht über 3,5 Tonnen wird basierend auf einer Studie der Internationalen Energieagentur (IEA) angenommen, dass für 10 Fahrzeuge eine HRS benötigt wird (IEA 2019). Für LNF liegt diese Zahl aufgrund der geringeren Tagesfahrleistungen bei 40 Fahrzeugen. Für Busse werden, basierend auf einem Bericht der Nationalen Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW), ebenfalls 10 FCV-Fahrzeuge pro HRS angesetzt (NOW 2022).

Analog zur Ladeinfrastruktur wird in der Modellierung auch bei den HRS nach 10 Jahren Lebensdauer die Infrastruktur ersetzt, insofern Ausbaubedarf besteht. Aufgrund der sich noch entwickelnden technologischen Standards wird hier angenommen, dass erneut die vollen CapEx investiert werden müssen. Bei den Anschaffungskosten der HRS wird, um technologischen Entwicklungen und Skaleneffekten Rechnung zu tragen, zwischen 2023 und 2030 eine reale Degression

von 10 Prozent unterstellt. Für die Berechnung der OpEx wird wie bei der Ladeinfrastruktur ein fixer jährlicher Anteil von 10 Prozent der CapEx angenommen.

Die folgende Tabelle zeigt die jährlichen Ausgaben für Wasserstofftankstellen im Vergleich der Szenarien. Bis zum Jahr 2030 entwickeln sich die Ausgaben für Wasserstofftankstellen in allen drei Szenarien gleich, da auch der Hochlauf der Brennstoffzellenfahrzeuge in den Szenarien ähnlich verläuft. Nach 2030 verliert der Straßenverkehr in den Zielszenarien zunehmend an relativer Bedeutung und damit sind auch die Zulassungen von Brennstoffzellenfahrzeugen geringer als im Referenzszenario, was zu geringeren Ausgaben für Wasserstofftankstellen führt. Insgesamt ist anzumerken, dass die Kosten für die Wasserstofftankstelleninfrastruktur im Vergleich zur Ladeinfrastruktur aufgrund des geringeren Hochlaufs von Brennstoffzellenfahrzeugen deutlich geringer ausfallen (siehe auch Kapitel 2.3 Entwicklung der Antriebstechnologien).

Tabelle 17: Ausgaben für Wasserstofftankstellen

in Mrd. Euro₂₀₂₂

	2019	2025	2030	2045
Referenz	0,05	0,16	0,52	1,41
Ziel 1	0,05	0,16	0,52	1,39
Ziel 2	0,05	0,16	0,52	1,38

| eigene Tabelle

3.5 Straßen- und Schienenfahrzeuge

Die jährlichen Ausgaben und Kosten für Fahrzeuge werden sowohl für Straßen- als auch für Schienenfahrzeuge ermittelt. Bei Straßenfahrzeugen werden die jährlichen Ausgaben anhand der Neuzulassungen und spezifischen Fahrzeugkosten berechnet. Dabei werden die Kosten der verschiedenen Antriebstechnologien für alle Kategorien von Straßenfahrzeugen berücksichtigt. Die Anzahl der benötigten Schienenfahrzeuge wird anhand der Verkehrsentwicklung in jedem Szenario bestimmt.

3.5.1 Pkw

Die jährlichen Ausgaben für Pkw werden basierend auf den Neuzulassungen und den spezifischen Kosten je Antriebstechnologie und Pkw-Segment berechnet. In den Szenarien gibt es unterschiedliche Entwicklungen bei den Neuzulassungen, da sich auch der *Modal Split* in den Szenarien unterscheidet. In den Zielszenarien ist die Nachfrage nach motorisiertem Individualverkehr langfristig geringer als im Referenzszenario (Abbildung 5).

Für die Pkw-Neufahrzeugflotte belaufen sich die Anschaffungskosten im Jahr 2023 auf rund 110 Mrd. Euro (netto). In Zielszenario 1, das eine verstärkte Elektrifizierung vorsieht, werden die Kosten für den Kauf von Pkw bis zum Jahr 2028 höher sein als im Referenzszenario. Trotzdem ist das Zielszenario 1 insgesamt mit Blick auf die Pkw-Ausgaben kostengünstiger, da langfristig weniger Pkw nachgefragt werden.

Durch den Rückgang der Batteriepreise werden Elektrofahrzeuge mittelfristig günstiger als vergleichbare Verbrennerfahrzeuge. Der Zeitpunkt, ab dem Elektrofahrzeuge günstiger sind als vergleichbare Benzin- oder Diesel-Pkw (*Break-even*), variiert je nach Fahrzeugsegment. Bei kleinen Pkw machen die Batteriekosten einen relativ großen Anteil an den Gesamtkosten aus. Daher werden Elektrofahrzeuge in den Segmenten Minis und Kleinwagen während des gesamten Betrachtungszeitraums teurer bleiben als entsprechende Benzin- und Dieselfahrzeuge. Bei den Kompaktwagen wird der *Break-even* im Jahr 2030 erreicht und in den folgenden Jahren sind Elektrofahrzeuge günstiger als Benzin- und Dieselfahrzeuge.

Die Fahrzeugpreise basieren auf der Prognos-internen Fahrzeugdatenbank. Diese speist sich aus dem ADAC-Fahrzeugportal (ADAC 2024). Die Entwicklung der Batteriepreispfade basiert auf Projektionen von Bloomberg (BloombergNEF 2023).

3.5.2 Straßengüterverkehr und Busse

Die jährlichen Ausgaben für Fahrzeuge des Straßengüterverkehrs und für Busse werden ähnlich wie bei den Pkw berechnet. Dabei werden die Neuzulassungen sowie die spezifischen Kosten nach Antriebstechnologie und Lkw-Größenklassen berücksichtigt. Bei den Neuzulassungen gibt es unterschiedliche Entwicklungen in den Szenarien. Dies liegt daran, dass die Nachfrage nach Straßengüterverkehr im Vergleich zum Referenzszenario in den Zielszenarien weniger stark steigt, dafür aber die Elektrifizierung in den Zielszenarien stärker ausgeprägt ist.

Im Jahr 2023 belaufen sich die Ausgaben für Straßengüterfahrzeuge auf rund 16 Mrd. Euro, wobei etwa 10 Mrd. Euro auf LNF entfallen. Aufgrund der steigenden Nachfrage, insbesondere nach LNF, und einem höheren Anteil an teuren Elektro-Lkw, steigen die Kosten für den Kauf von Straßengüterfahrzeugen in Zielszenario 1 auf 26,4 Mrd. Euro im Jahr 2030. Im Vergleich dazu liegen die Kosten im Referenzszenario bei etwa 24,7 Mrd. Euro im Jahr 2030.

Für Nah- und Regionalbusse werden im Jahr 2023 Fahrzeugkosten von etwa 2,3 Mrd. Euro berechnet. Diese steigen in Zielszenario 1 aufgrund stärkerer Elektrifizierung und höherem Fahrzeugbedarf auf etwa 5 Mrd. Euro bis zum Jahr 2030 und auf etwa 6 Mrd. Euro bis zum Jahr 2045 (inflationbereinigt). Das Referenzszenario entwickelt sich bei den Bussen bis 2030 ähnlich, danach nimmt die Nachfrage im Verkehr mit Bussen jedoch deutlich ab. Dadurch geht der Fahrzeugbedarf zurück und die Kosten für Busse betragen im Jahr 2045 nur noch etwa 1,8 Mrd. Euro.

Die Kosteninformationen für die Straßengüterfahrzeuge basieren auf dem Kaufentscheidungsmodell der Prognos AG. Dieses wiederum basiert auf unterschiedlichen Quellen wie dem International Council of Clean Transportation (icct) oder BloombergNEF (BloombergNEF 2023; icct 2023). Die Kosteninformationen für Busse basieren auf einer laufenden Begleitforschung im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz, die zum Zeitpunkt der Berichterstellung noch nicht veröffentlicht war.

3.5.3 Schienenfahrzeuge

Die Ausgaben und Kosten für Schienenfahrzeuge werden für alle betrachteten Schienenverkehrsmittel errechnet. Dazu zählen die Stadtbahnen, der Schienenpersonennahverkehr und Schienenpersonenfernverkehr sowie der Schienengüterverkehr.

Die Rechnungen zu den Ausgaben für die Fahrzeugflotte der **Stadtbahnen** und des Schienenpersonennahverkehrs basieren auf den Analysen von Ramboll. Für das Jahr 2022 werden die Ausgaben des spurgeführten öffentlichen Personenverkehrs auf rund 5 Mrd. Euro geschätzt, wobei Fahrzeug- und Materialkosten etwa 30 Prozent ausmachen (Ramboll 2023). Das entspricht bei den Stadtbahnen Fahrzeugkosten von rund 1,5 Mrd. Euro im Jahr 2022. Bis zum Jahr 2030 steigen diese Kosten in Zielszenario 1 auf etwa 2,4 Mrd. Euro (nominal) an, während sie im Referenz- und Zielszenario 2 bei rund 2,2 Mrd. Euro (nominal) liegen. Im Referenzszenario sinken die Fahrzeugkosten bis 2045 auf etwa 1,5 Mrd. Euro (nominal), während sie in den Zielszenarien aufgrund der steigenden Nachfrage bei den Stadtbahnen auf rund 4 Mrd. Euro (nominal) anwachsen.

Im Jahr 2022 werden die Produktionskosten im **Schienenpersonennahverkehr** auf etwa 14 Mrd. Euro geschätzt, was mehr als doppelt so hoch ist wie bei den Stadtbahnen. Der Kostenanteil für Fahrzeuge und Material beträgt dabei etwa 23 Prozent und ist damit etwas niedriger als bei den Stadtbahnen (Ramboll 2023). Die Verkehrsleistung im Schienenpersonennahverkehr wird in dieser Studie auf rund 64 Mrd. Pkm geschätzt, was knapp ein Viertel höher ist als von Ramboll für das gleiche Jahr angenommen. Daher belaufen sich die Ausgaben für Fahrzeuge im Jahr 2022 auf etwa 3,8 Mrd. Euro für Züge und Material im Schienenpersonennahverkehr. In nominalen Werten steigen die Ausgaben bis zum Jahr 2045 in den Zielszenarien auf über 11 Mrd. Euro an, wobei sich auch die Nachfrage mehr als verdoppelt. Im Referenzszenario wird eine Nachfragesteigerung von rund 20 Prozent im Jahr 2045 im Vergleich zu 2019 erwartet und die Kosten steigen um rund 87 Prozent auf 8,9 Mrd. Euro (nominal) an.

Die Investitionen in die Fahrzeugflotte des **Schienenpersonenfernverkehr** basieren auf Zahlen aus den *Integrierten Berichten* der Deutschen Bahn (DB 2023). Dabei wird aus Brutto-Investitionen des Deutsche-Bahn-Unternehmens DB Fernverkehr – der Großteil dieser Investitionen fließt in die Fahrzeugflotte – und der Verkehrsleistung des Schienenpersonenfernverkehrs ein Faktor errechnet. Diese spezifischen Kosten für Züge werden auf dem Basiswert von 2023 unter Einberechnung eines jährlichen Wachstumsfaktors – bis 2030 gemäß VDV-Gutachten um 2,5 Prozent – steigen (Roland Berger und VDV 2021b). Für die Folgejahre werden die spezifischen Kosten als real konstant angenommen. Somit werden aus der Verkehrsleistung des Schienenpersonenfernverkehrs im jeweiligen Szenario die Investitionen in die Fahrzeugflotte rückgerechnet.

Tabelle 18: Parameter zur Fortschreibung der Investitionen in Schienenfahrzeuge

	2018	2019	2020	2021	2022	01-06 22	01-06 23
Brutto-Investitionen DB Fernverkehr in Mio. Euro	1.081	1.241	1.290	1.507	1.667	793	814
Verkehrsleistung Schienenpersonenfernverkehr in Mio. Pkm	42.827	44.151	23.542	24.762	41.720	18.339	21.658
Faktor Brutto-Invest./Verkehrsleistung in Euro/Pkm	0,025	0,028	0,055	0,061	0,040	0,043	0,038

| eigene Tabelle auf Basis (DB 2023)

Für die Berechnung der Ausgaben und Kosten der **Schienengüterverkehrsflotte** werden die Angaben aus dem VDV-Gutachten (Roland Berger und VDV 2021a) verwendet. Laut dieser Studie gab es im Jahr 2020 insgesamt etwa 4.100 Lokomotiven (Strecken- und Rangierlokomotiven) und rund 158.000 Güterwagen im Schienengüterverkehr. Der Neuwert dieser Fahrzeuge beträgt etwa 27 Mrd. Euro. Bei einer Abschreibedauer von 20 Jahren (gemäß AfA-Tabellen) entstehen jährliche Kosten von etwa 1,3 Mrd. Euro. Diese 1,3 Mrd. Euro dienen als Grundlagen für die Berechnung der spezifischen Flottenkosten im Schienengüterverkehr. Im Jahr 2020 liegen diese bei 1,11 Cent/Tkm. Gemäß VDV-Gutachten werden sie bis 2030 jährlich um 2,5 Prozent (Roland Berger und VDV 2021a) steigen. In den Folgejahren nach 2030 wurde die Kostensteigerung als real konstant angenommen.

Geprüft wurden auch die Geschäftsberichte der DB Cargo. Im Jahr 2020 betrug der Materialaufwand etwa 2,5 Mrd. Euro (DB 2023). Der Materialaufwand beinhaltet jedoch viele weitere Aufwendungen, unter anderem für Energie und eingekaufte Transportleistungen, so dass der Aufwand der Flotte nicht sinnvoll bestimmt werden konnte.

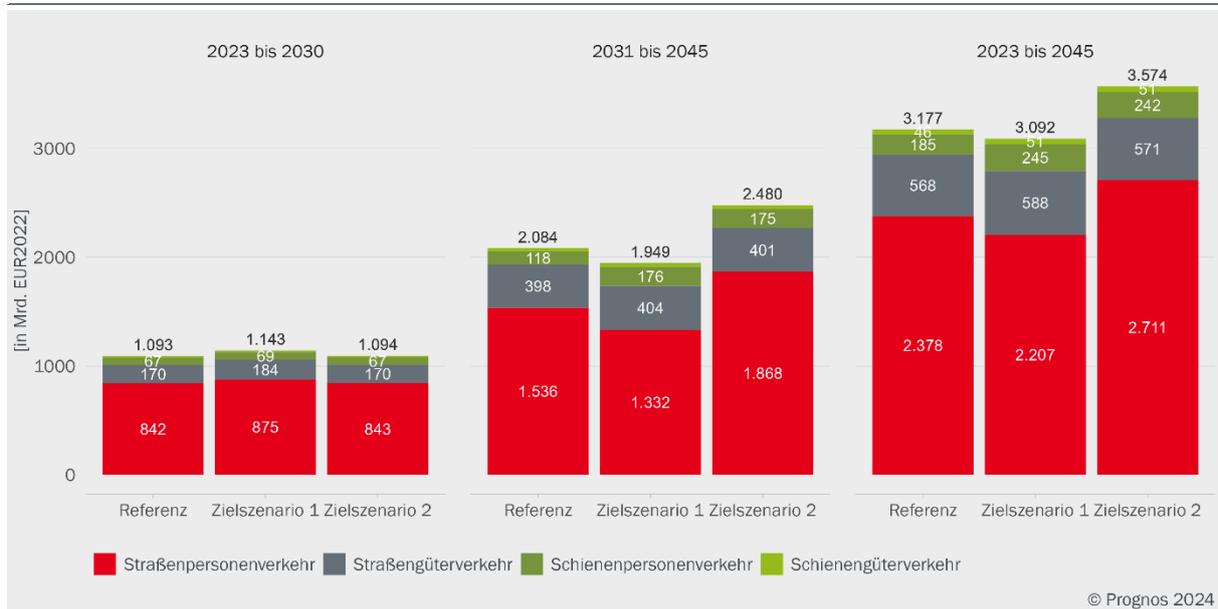
3.5.4 Ergebnisse: Ausgaben und Kosten der Straßen- und Schienenfahrzeuge

Abbildung 16 zeigt die kumulierten realen Gesamtausgaben für Fahrzeuge im Personen- und Güterverkehr auf den Verkehrsträgern Straße und Schiene in drei Zeiträumen. Zwischen 2023 und 2030 werden in Zielszenario 1 rund 50 Mrd. Euro mehr investiert als in den beiden anderen Szenarien. Dagegen sind zwischen 2031 und 2045 die Ausgaben im Referenzszenario und Zielszenario 1 gegenüber dem Zielszenario 2 deutlich niedriger, wobei in Zielszenario 1 nochmal wesentlich weniger für Straßen- und Schienenfahrzeuge ausgegeben werden muss als im Referenzszenario. Über den gesamten Zeitraum betrachtet sind die Ausgaben für Fahrzeuge in Zielszenario 2 mit Abstand am höchsten und in Zielszenario 1 klar am niedrigsten.

Grund hierfür ist das modellierte Abwrackprogramm. Dieses führt in Zielszenario 2 zu höheren Pkw-Ausgaben in den Jahren 2031 bis 2037. In allen drei Szenarien entfallen über zwei Drittel der Ausgaben auf den Straßenpersonenverkehr, wobei dieser Anteil in Zielszenario 1 im Vergleich zu den anderen Szenarien am niedrigsten ist. Dafür wird in Zielszenario 1 relativ gesehen jeweils deutlich mehr für die Fahrzeuge im Schienenpersonenverkehr und im Schienengüterverkehr ausgegeben. Der Anteil der Ausgaben für den Schienenverkehr an den kumulierten realen Gesamtausgaben ist insgesamt betrachtet gegenüber dem Anteil der Ausgaben für den Straßenverkehr jedoch gering.

Abbildung 16: Fahrzeuge und Züge – Ausgaben kumuliert nach Verkehrsmittel

Kumulierte reale Ausgaben für die Zeiträume 2023 bis 2030, 2031 bis 2045 und 2023 bis 2045

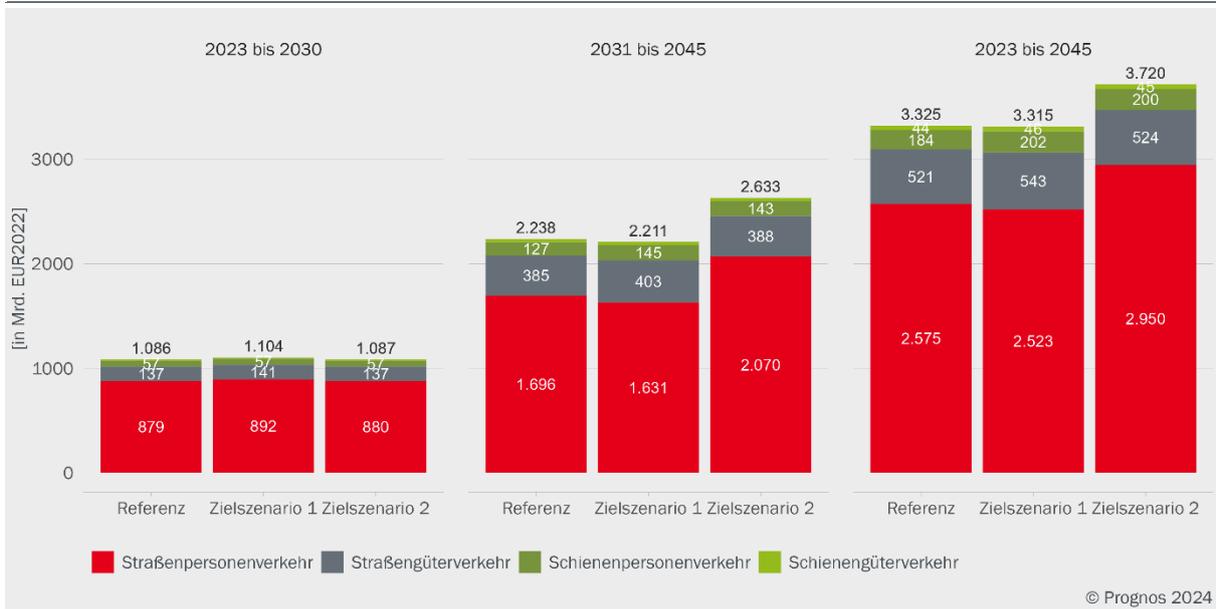


| eigene Abbildung

Ein ähnliches Bild ergibt sich für die kumulierten Gesamtkosten. Bei den Kosten werden die jährlichen Ausgaben über die Lebensdauer der Güter abgeschrieben und verzinst. Die realen Ausgaben bei den Straßenfahrzeugen entwickeln sich relativ konstant, weshalb die Kosten aufgrund der Verzinsung über den Ausgaben liegen. Bei den Schienenfahrzeugen wird vor allem in den Zielszenarien ein starker Anstieg der Ausgaben im Zeitverlauf erwartet, was zu niedrigeren kumulierten Kosten im Vergleich zu den kumulierten Ausgaben führt (Abbildung 17).

Abbildung 17: Fahrzeuge und Züge – Kosten kumuliert nach Verkehrsmittel

Kumulierte Kosten für die Zeiträume 2023 bis 2030, 2031 bis 2045 und 2023 bis 2045



eigene Abbildung

3.6 Personalkosten

Die Personalkosten spielen im öffentlichen Personenverkehr und im Straßengüterverkehr eine erhebliche Rolle. Sie sind ein großer Kostenblock, da der Betrieb und die Wartung von Fahrzeugen und Infrastruktur sowie die Gewährleistung von Sicherheitsstandards eine große Anzahl von qualifizierten Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern erfordern. Diese Kosten umfassen sowohl die direkten Gehälter und Löhne der Mitarbeitenden als auch indirekte Kosten wie Sozialabgaben und Aus- und Weiterbildungskosten. Insgesamt stellen sie einen entscheidenden Faktor für die Wirtschaftlichkeit und Effizienz dar und haben wesentlichen Einfluss auf die Preisgestaltung und das Leistungsangebot. Die Entwicklung der Personalkosten in der Transport- und Logistikbranche hängt von einer Reihe von Faktoren ab. Erhebliche Einflussfaktoren sind das Lohnniveau sowie gesetzliche Vorgaben bezüglich des Mindestlohnes oder Sozialabgaben. Die allgemeinen wirtschaftlichen Bedingungen und die Arbeitsmarktsituation beeinflussen ebenfalls die Personalkostenentwicklung. Darüber hinaus hat auch die technologische Entwicklung einen Einfluss, denn Automatisierung und Digitalisierung können dazu führen, dass weniger Personal benötigt wird oder dass es zu Anpassungen der Qualifikationsanforderungen kommt.

Es besteht bereits heute und bedingt durch den demografischen Wandel auch zukünftig ein hoher Personalmangel in der Branche. Angesichts der angestrebten Wachstumsziele der Branche im Zuge der Verkehrswende ist sogar mit einem erhöhten Personalbedarf zu rechnen: In Zukunft sollen deutlich mehr Busse und Bahnen unterwegs sein und mehr Güter auf der Schiene transportiert werden. Parallel dazu ist absehbar, dass weiterhin ein substanzieller Anteil des Gütertransports über Straßenverbindungen erfolgt. Im Straßengüterverkehr liegen die Personalkosten verglichen mit dem Schienengüterverkehr insgesamt deutlich höher, da ein Lkw wesentlich

weniger Güter transportieren kann als ein Güterzug – der Personalbedarf pro Aufkommen ist im Straßengüterverkehr also wesentlich höher.

Die Ermittlung der Personalkosten innerhalb der unterschiedlichen Verkehrszweige erfolgt über jährliche Preisfortschreibungssätze basierend auf einer Studie von Ramboll (Ramboll 2023) und eigenen Berechnungen. Die jährlichen Preisfortschreibungssätze sind in folgender Tabelle dargestellt:

Tabelle 19: Angenommene Teuerungsraten zur Fortschreibung der nominalen Personalkosten

Preisfortschreibungssätze (nominal)	2023	2024	2025 – 2030	ab 2031
Personal	6%	4,5%	3%	real konstant

eigene Tabelle auf Basis eigener Berechnungen und (Ramboll 2023)

3.6.1 Busse, Stadtbahnen und Schienenpersonennahverkehr

Die Personalkosten im Bus-, Stadtbahnverkehr und Schienenpersonennahverkehr werden anhand der Anteile der Personalkosten an den Gesamtkosten in diesen drei Verkehrssegmenten sowie anhand von Preisfortschreibungssätzen ermittelt, die auf einer Studie von Ramboll aus dem Jahr 2023 basieren (Ramboll 2023). Die für den Busverkehr errechneten Personalkosten-Gewichte werden als Mittelwerte der von Ramboll im Stadt- und Regionalbusverkehr angenommenen Gewichte errechnet.

Für das Jahr 2022 ergeben sich spezifische Personalkosten im Busverkehr von 19 Cent/Pkm. Bei den Stadtbahnen und im Schienenpersonennahverkehr werden zunächst die Gesamtkosten des Betriebs berechnet und davon über die aus der Studie von Ramboll entnommenen Anteile die Personalkosten errechnet. Damit ergeben sich für das Jahr 2022 spezifische Personalkosten bei den Stadtbahnen in der Höhe von 17 Cent/Pkm und für den Schienenpersonennahverkehr von 6 Cent/Pkm. Die spezifischen Personalkosten entwickeln sich anhand der in Tabelle 19 angegebenen Preisfortschreibungssätze.

3.6.2 Schienenpersonenfernverkehr

Die Personalkosten des Schienenpersonenfernverkehrs basieren auf Zahlen aus den *Integrierten Berichten* der Deutschen Bahn (DB 2023). Dabei wird aus dem Personalaufwand des Deutsche-Bahn-Unternehmens DB Fernverkehr und der Verkehrsleistung des Fernverkehrs ein Faktor errechnet, der ab 2023 unter Einberechnung eines jährlichen Wachstumsfaktors fortgeschrieben wird. Somit können aus der Verkehrsleistung (Personenverkehr-fern) des jeweiligen Szenarios die Personalkosten rückgerechnet werden.

Tabelle 20: Fortschreibung der Personalkosten im Schienenpersonenfernverkehr

	2018	2019	2020	2021	2022	01-06 22	01-06 23
Personalaufwand DB Fernverkehr in Mio. Euro	978	1.054	1.119	1.199	1.264	619	658
Verkehrsleistung Schienenpersonenfernverkehr in Mio. Pkm	42.827	44.151	23.542	24.762	41.720	18.339	21.658
Faktor Personalaufw./Verkehrsleistung in Euro/Pkm	0,023	0,024	0,048	0,048	0,030	0,034	0,030

| eigene Tabelle auf Basis (DB 2023)

3.6.3 Straßengüterverkehr

Die Berechnung der Personalkosten im Straßengüterverkehr erfolgt basierend auf der jährlichen Fahrleistung und der Entlohnung eines Berufskraftfahrers. Dabei werden Fahrten mit LNF und SNF unterschieden. Es wird angenommen, dass pro Jahr 230 Arbeitstage anfallen, wobei für LNF eine durchschnittliche Tagesfahrleistung von 160 km und für SNF eine durchschnittliche Tagesfahrleistung von 450 km zugrunde gelegt wird. Die Berechnungsannahmen sind in der folgenden Tabelle 21 zusammengefasst. Beim Bruttolohn ist das Gehaltsniveau innerhalb Deutschlands maßgeblich. Für LNF wird ein Gehaltsabschlag von 15 Prozent berücksichtigt, da zum Führen dieser Fahrzeuge lediglich ein Führerschein der Klasse C+ erforderlich ist. Die Kosten pro Kilometer (Euro/km) werden auf Basis der Tagesfahrleistung berechnet und anschließend mit der prognostizierten Gesamtfahrleistung von LNF und SNF verrechnet.

Tabelle 21: Lohnannahmen für BerufskraftfahrerInnen

Parameter	Einheit	Wert	Quelle	Annahme
Brutto-Monatslohn	Euro	2.580	Lohnspiegel 2023 (Bünger et al. 2023)	BerufskraftfahrerIn mit Tarifvertrag, 10 Jahre Berufserfahrung
Netto-Monatslohn	Euro	1.812	Handelsblatt-Rechner (Handelsblatt 2024)	Steuerjahr 2023, Steuerklasse I
Brutto-Jahreslohn	Euro	30.960	Lohnspiegel 2023 (Bünger et al. 2023)	
Netto-Jahreslohn	Euro	21.744		
Steuersatz	Prozent	30 %		
Arbeitstage	Tage	230		
Abschlag LNF	Prozent	15 %		Lohnabschlag LNF im Vergleich zu BerufskraftfahrerIn (Klasse C+)

eigene Tabelle auf Basis (Bünger et al. 2023; Handelsblatt 2024)

3.6.4 Schienengüterverkehr

Die Personalkosten des Schienengüterverkehrs basieren auf durchschnittlichen Gehaltsangaben der Agentur für Arbeit (Agentur für Arbeit 2024). Mithilfe von Zahlen von Allianz pro Schiene kann der Personalaufwand des Schienengüterverkehrs für das Jahr 2019 geschätzt und bis 2022 fortgeschrieben werden (Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung 2021). Verrechnet mit der Ex-post-Verkehrsleistung des Schienengüterverkehrs ergibt sich ein Faktor, der ab 2023 unter Einberechnung eines jährlichen Wachstumsfaktors fortgeschrieben wird. Somit können aus der Verkehrsleistung (Schienengüterverkehr) des jeweiligen Szenarios die Personalkosten rückgerechnet werden.

Tabelle 22: Fortschreibung der Personalkosten des Schienengüterverkehrs

	2019	2020	2021	2022
Personalaufwand Schienengüterverkehr in Mio. Euro	894	878	892	918
Verkehrsleistung Schienengüterverkehr in Mrd. Tkm	129	120	130	140
Faktor in Euro/1.000 Tkm	6,92	7,33	6,87	6,58

| eigene Berechnung auf Basis (Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung 2021; Agentur für Arbeit 2024)

Automatisierung im Schienengüterverkehr

Ein entscheidender Schritt zur Sicherung eines langfristig wettbewerbsfähigen Schienengüterverkehrs ist die Implementierung von Automatisierungs- und Digitalisierungstechnologien. Sowohl bei Rangier- und Kupplungsprozessen als auch auf der Strecke können Prozesse durch digitale Technologien effizienter gestaltet werden. Dazu zählen automatische Bremsproben und Kupplungssysteme sowie Fahrerassistenzsysteme und ferngesteuerte Mittellokomotiven für besonders lange Züge. Eine entsprechende Telematik- und Sensorenausstattung von Zügen kann zudem auf der Strecke die kontinuierliche Ortung der Wagen via GPS und damit eine genauere Prognose der Ankunftszeiten wie auch die Übermittlung von Informationen zum Zustand der Ladung und des Wagens selbst ermöglichen. Automatisierung und Digitalisierung im Schienengüterverkehr bieten auf diese Weise nicht nur das Potenzial für betriebswirtschaftliche Einsparungen, sondern auch für die Steigerung der Dienstleistungsqualität und die Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit (Zapp 2018; Müller 2021).

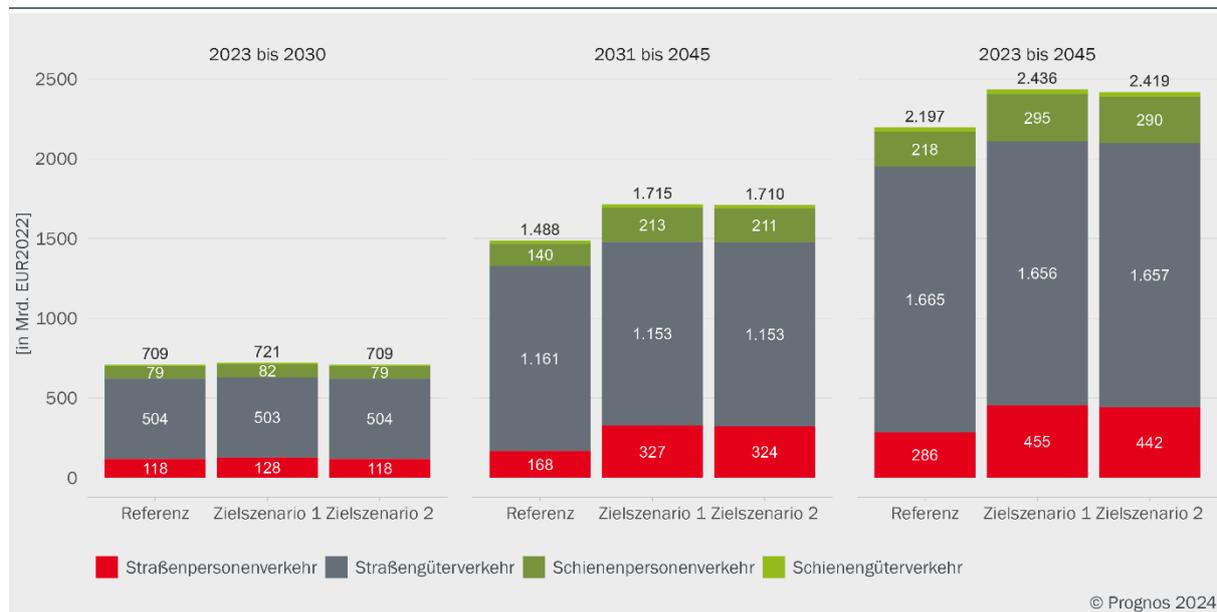
3.6.5 Ergebnisse: Kosten für Personal

Abbildung 18 zeigt die kumulierten Gesamtkosten für Personal im Personen- und Güterverkehr auf den Verkehrsträgern Straße und Schiene in drei Zeiträumen. Zwischen 2023 und 2030 werden in Zielszenario 1 rund 12 Mrd. Euro mehr ausgegeben als in den beiden anderen Szenarien. Zwischen 2031 und 2045 sind die Kosten in den beiden Zielszenarien gegenüber dem Referenzszenario gut 15 Prozent höher, wobei auch in diesem Zeitraum in Zielszenario 1 am meisten ausgegeben wird. Über den gesamten Zeitraum wird in den beiden Zielszenarien gut 10 Prozent mehr für Personal ausgegeben als im Referenzszenario. In Zielszenario 1 wird am meisten ausgegeben (mit 17 Mrd. Euro mehr als in Zielszenario 2).

In den beiden Zielszenarien entfallen insgesamt etwas weniger und im Referenzszenario etwas mehr als 70 Prozent der Personalkosten auf den Straßengüterverkehr. Insgesamt liegen die Personalkosten im Schienenverkehr in den beiden Zielszenarien aufgrund der stärkeren Verlagerung auf die Schiene deutlich höher als im Referenzszenario. Beim Schienengüterverkehr zeigt sich gegenüber dem Straßengüterverkehr deutlich die Effizienz im Hinblick auf die Personalkosten. Durch die Verlagerung auf die Schiene können somit insgesamt Personalkosten eingespart werden. Da es sich bei den Personalkosten um laufende Ausgaben (OpEx) handelt, entsprechen die Ausgaben gleichzeitig den jährlichen Kosten.

Abbildung 18: Personal - Kosten kumuliert nach Verkehrsmittel

Kumulierte Kosten für die Zeiträume 2023 bis 2030, 2031 bis 2045 und 2023 bis 2045



eigene Abbildung

3.7 Wartungskosten

Die Grundlage der Kostenannahmen für die Wartungskosten im **Pkw-Verkehr** stammt aus der Effizienzstudie, bei der Prognos auch beteiligt war (dena 2021). Zunächst werden über Mittelwerte der Fahrzeugklassen nach Antriebsarten spezifische Wartungskosten für die Pkw in Euro pro Kilometer ermittelt (Tabelle 23).

Tabelle 23: Spezifische Wartungskosten für Pkw

in Euro pro km (real, 2022)

Antriebsart	spezifische Wartungskosten
Benzin/ Hybrid Benzin	0,052
Diesel/ Hybrid Diesel	0,055
CNG/ Hybrid CNG/ LPG	0,060
PHEV (Benzin/Diesel)	0,047
BEV	0,033
FCV	0,044

| eigene Tabelle auf Basis (dena 2021)

Die spezifischen Wartungskosten werden für die drei Szenarien mit den Pkw-Fahrleistungen, differenziert nach Antriebsart verrechnet.

Für **Busse** konnten die Wartungskosten direkt aus der laufenden Begleitforschung für Elektro-Busse abgeleitet werden (pwc und Prognos AG et. al. 2024). Für das Jahr 2022 wurden spezifische Wartungskosten von 52 Cent/Fzghm für Dieselsebusse und 39 Cent/Fzghm für batterieelektrische Busse angenommen.

Die Kosten für Unterhalt und Reparatur (inkl. Reifen) werden beim **Straßengüterverkehr** aus der Studie „Nullemissionsnutzfahrzeuge“ abgeleitet und betragen beim Diesel-Lkw rund 6 Cent/Fzghm (e-mobil BW 2017). Beim elektrischen Antrieb werden geringere Wartungskosten erwartet als beim konventionellen Verbrennungsmotor, da keine Kosten für Motoröl, Luftfilter usw. anfallen. Die Kostendifferenz zwischen Diesel- und BEV-Lkw beträgt rund 30 Prozent bei den Wartungskosten, zu diesem Ergebnis kommt auch eine Studie von ICCT (icct 2023). Die nach Szenarien differenzierten Wartungskosten werden analog zur Berechnung im Pkw-Verkehr mittels der spezifischen Wartungskosten und der prognostizierten Fahrleistung in den einzelnen Szenarien differenziert nach Antriebsart errechnet. Die spezifischen Wartungskosten werden als real konstant angenommen.

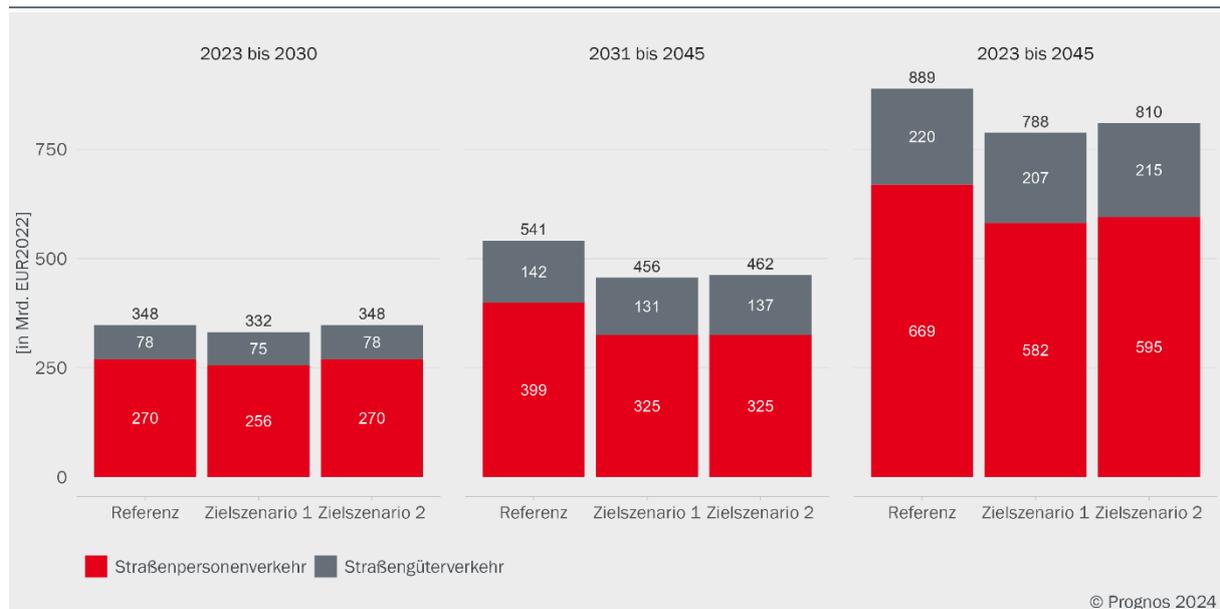
Die Wartungskosten im **Schieneverkehr** werden nicht separat ermittelt. Es wird angenommen, dass die Wartungskosten grundsätzlich als Aufwand in den zugrunde gelegten Flottenkosten für Schienenfahrzeuge enthalten sind (siehe Kapitel 3.5.3). Die Wartungskosten im Schienenverkehr werden in den Ergebnissen dieser Studie nicht separat ausgewiesen.

In Abbildung 19 sind die kumulierten Gesamtkosten für die Wartung von Fahrzeugen im Straßenverkehr in drei verschiedenen Zeiträumen dargestellt. Im Zeitraum bis 2030 liegen die Wartungskosten in Zielszenario 1 rund 16 Mrd. Euro niedriger als im Referenz- und in Zielszenario 2. Im Zeitraum von 2031 bis 2045 führt die verstärkte Verlagerung von Pkw- und Lkw-Verkehr auf die Schiene sowie die höheren Anteile elektrischer Fahrzeuge in den beiden Zielszenarien im Vergleich zum Referenzszenario zu um knapp 16 Prozent geringeren Wartungskosten. Folglich ist Zielszenario 1 über den gesamten Betrachtungszeitraum das günstigste Szenario bei den Wartungskosten.

In allen drei Szenarien entfallen über zwei Drittel der Kosten für Wartung auf den Straßenpersonenverkehr. Die restlichen Kosten entfallen auf Straßengüterfahrzeuge. Die Kosteneinsparungen in den beiden Zielszenarien entstehen hauptsächlich durch die Verlagerung im Straßenpersonenverkehr. Hier kommt es zu Einsparungen zwischen 11 und 13 Prozent. Im Straßengüterverkehr liegen die relativen Unterschiede zwischen Zielszenarien und Referenzszenario zwischen 2 und 6 Prozent. Da es sich bei den Energiekosten um laufende Ausgaben handelt (OpEx), sind die realen Ausgaben identisch mit den Kosten.

Abbildung 19: Wartungskosten - Kosten kumuliert nach Verkehrsmittel

Kumulierte Kosten für die Zeiträume 2023 bis 2030, 2031 bis 2045 und 2023 bis 2045



| eigene Abbildung

3.8 Energiekosten

Die Energiekosten für den Verkehrssektor werden auf Basis des Energieverbrauchs nach Verkehrszweig und Energieträger (vergleiche Ergebnisse in Kapitel 2.4) und der volkswirtschaftlichen Energiekosten berechnet. Die jährlichen Energieverbräuche für jeden Verkehrszweig basieren auf den Modellierungen der drei Szenarien dieser Studie. Die volkswirtschaftlichen Energiekosten beinhalten keine Energiesteuer, CO₂-Abgabe und Mehrwertsteuer. Bei den Stromkosten werden die Kosten für den EU-ETS herausgerechnet. Die Entwicklung der volkswirtschaftlichen Energiekosten nach Energieträgern stützt sich auf eine aktuelle Version der Prognos-Energiepreisprojektion für Deutschland (Prognos AG 2024). Die Ergebnisse dieser Projektionen sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

Tabelle 24: Spezifische volkswirtschaftliche Energiekosten nach Energieträger

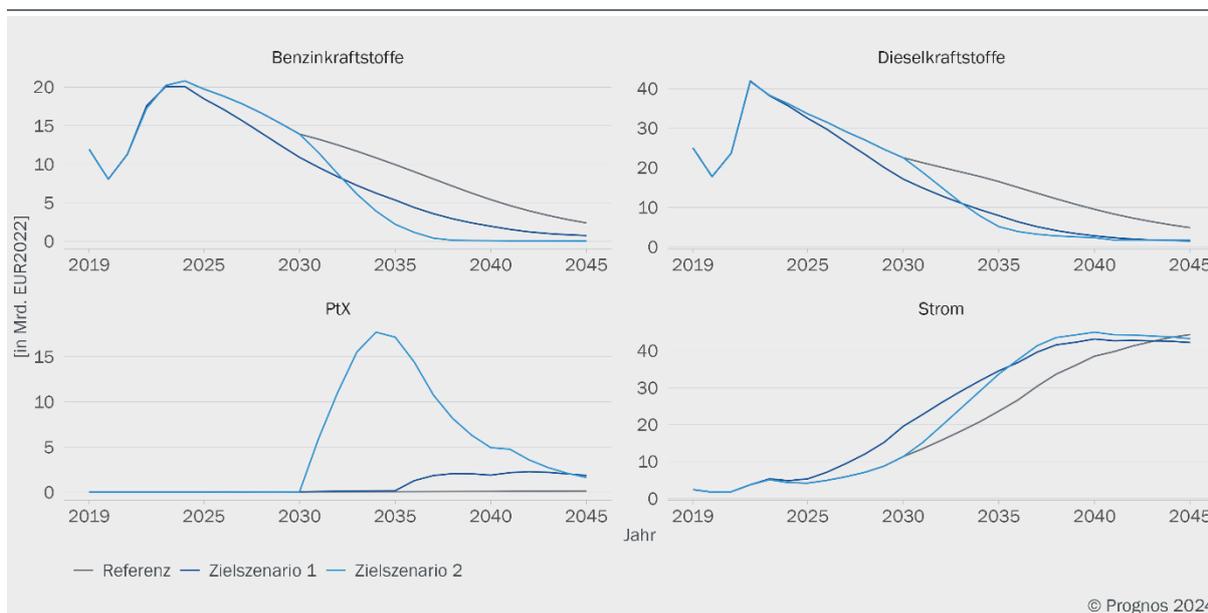
Volkswirtschaftliche Energiekosten ohne Umsatzsteuer, Energie- und Stromsteuer sowie ohne CO₂-Preise (BEHG) und Strom auch ohne CO₂-Kosten nach EU-ETS

Energieträger	Einheit	2019	2025	2030	2045
Benzin	Euro ₂₀₂₀ /l	0,53	0,85	0,78	0,83
Diesel	Euro ₂₀₂₀ /l	0,60	0,92	0,80	0,86
Strom	Euro ₂₀₂₀ /kWh	0,23	0,18	0,22	0,25
PtL	Euro ₂₀₂₀ /l	k.A.	3,14	2,42	1,56

| eigene Tabelle auf Basis der Prognos-Energiepreisprojektion (Prognos AG 2024)

Die Energiepreisentwicklung der letzten Jahre hat dazu geführt, dass die Energiekosten für alle Energieträger zwischen 2020 und 2022 stark angestiegen sind. Bis zum Jahr 2030 sinken die Energiekosten in allen Szenarien auf ein ähnliches Niveau, wobei es differenziert nach Energieträgern deutliche Unterschiede in der Entwicklung gibt. Im Referenzszenario und in Zielszenario 2 sind die Minderungen bei den fossilen Kraftstoffen noch weniger stark ausgeprägt als in Zielszenario 1. Insgesamt werden die Energiekosten (in realen Werten) in allen Szenarien von rund 70 Mrd. Euro im Jahr 2023 auf rund 56 Mrd. Euro (-20 Prozent) im Jahr 2030 sinken. In Zielszenario 1 werden die Kosten für Benzin- und Dieselmotoren bis 2030 geringer sein, dafür werden die Stromkosten höher ausfallen. Hingegen werden die Energiekosten in Zielszenario 2 aufgrund von PtX-Beimischungen nach 2030 deutlich höher sein.

Abbildung 20: Energiekosten nach Szenario und Kraftstoffart



eigene Abbildung

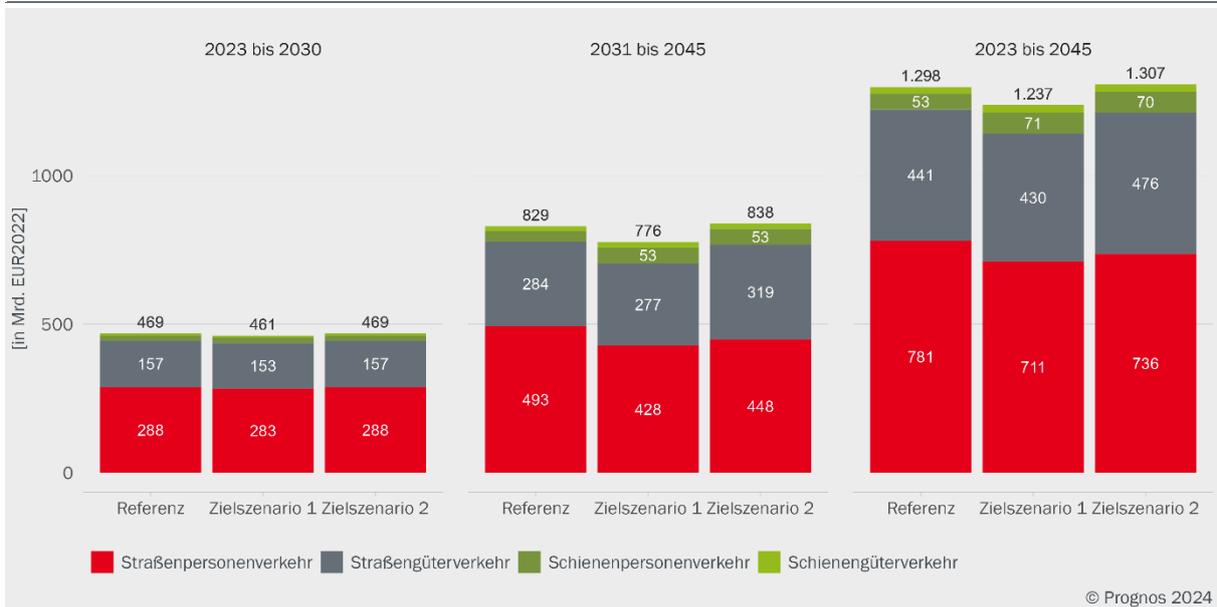
In Abbildung 21 sind die kumulierten Gesamtkosten für Energie im Personen- und Güterverkehr auf den Verkehrsträgern Straße und Schiene in drei verschiedenen Zeiträumen dargestellt. Es zeigt sich, dass zwischen 2023 und 2030 im Referenzszenario und in Zielszenario 2 etwas mehr für Energie ausgegeben wird als in Zielszenario 1. Insgesamt sind die Energiekosten im Zeitraum von 2023 bis 2030 in Zielszenario 1 etwa 1,7 Prozent günstiger als im Referenzszenario. Dies setzt sich auch im Zeitraum zwischen 2031 und 2045 fort. In Zielszenario 1 sind die Kosten für Benzin- und Dieselmkraftstoffe niedriger als im Referenzszenario, da hier verstärkt auf Elektrifizierung gesetzt wird. Dadurch steigen jedoch die Kosten für Strom.

Im Zeitraum von 2031 bis 2045 führt die verstärkte Elektrifizierung von Pkw und Lkw im ersten Zielszenario zu niedrigeren Energiekosten im Straßenpersonenverkehr im Vergleich zum Referenzszenario. Die Energiekosten in diesem Szenario liegen etwa 6,4 Prozent unter denen des Referenzszenarios. Im zweiten Zielszenario hingegen werden zur beschleunigten Dekarbonisierung auch teurere strombasierte Kraftstoffe im Straßenverkehr eingesetzt, was insgesamt zu höheren Energiekosten im Vergleich zu den anderen Szenarien führt. Im Jahr 2034 steigen die Mehrkosten für strombasierte Kraftstoffe auf bis zu 17,7 Mrd. Euro, die zu rund 40 Prozent vom Straßengüterverkehr, zu rund 45 Prozent vom Pkw-Verkehr und zu rund 15 Prozent vom Schienen- und Binnenschiffsverkehr getragen werden.

In allen drei Szenarien entfällt etwas mehr als die Hälfte der Kosten für Energie auf den Straßenpersonenverkehr. Der restliche Anteil der Kosten entfällt hauptsächlich auf Straßengüterfahrzeuge. Der Anteil der Kosten für den Schienenpersonen- und Schienengüterverkehr an den kumulierten realen Gesamtkosten ist im Vergleich zu den Kosten für den Straßenpersonen- und Straßengüterverkehr gering. Da es sich bei den Energiekosten um laufende Ausgaben handelt (OpEx), sind die realen Ausgaben identisch mit den Kosten.

Abbildung 21: Energie - Kosten kumuliert nach Verkehrsmittel

Kumulierte Kosten für die Zeiträume 2023 bis 2030, 2031 bis 2045 und 2023 bis 2045



eigene Abbildung

3.9 Klimaschadenskosten (externe Kosten)

Der Verkehrssektor trägt durch die Emission von Luftschadstoffen, Lärm und Treibhausgasen, aber beispielsweise auch durch Zerschneidungseffekte der Infrastruktur erheblich zu Umwelt- und Klima- sowie Gesundheitsbelastungen bei. Gemäß einer Studie von Infras verursachte der Verkehr in Deutschland externe Kosten in Höhe von 149 Mrd. Euro im Jahr 2017 (Infras 2019). Je nach Kostenkategorie entstehen externe Kosten sowohl direkt im Betrieb (durch Verbrennung von Kraftstoffen, Reifenabrieb und Aufwirbelung von Staub) als auch indirekt in den verschiedenen Lebenszyklusphasen bei der Herstellung und Wartung von Fahrzeugen oder bei der Bereitstellung von Kraftstoffen und Infrastrukturen. Insbesondere bei konventionell angetriebenen Fahrzeugen spielen die während der Fahrt entstehenden direkten Emissionen eine wesentliche Rolle. Bei elektrisch angetriebenen Fahrzeugen sind dagegen indirekte Wirkungen von höherer Relevanz. Untersuchungen zu Klimaschadenskosten im Verkehr unterstreichen den ökologischen Nutzen eines gut ausgebauten öffentlichen Verkehrs. So betragen die Umweltkosten im Jahr 2022 für Pkw 5,5 Cent/Pkm, für Nahverkehrszüge 3,6 Cent/Pkm und für Linienbusse nur 3,2 Cent/Pkm (UBA 2023a). Eine umfassende Berechnung der gesamten externen Kosten im Verkehr ist komplex und würde den Rahmen dieser Studie sprengen. Eine Quantifizierung erfolgte deshalb nur für die Klimaschadenskosten.

Gemäß der Methodenkonvention 3.1 des Umweltbundesamtes (UBA) steigt der Kostensatz für Klimaschadenskosten von 195 Euro pro Tonne CO₂ im Jahr 2020 auf 215 Euro pro Tonne CO₂ im Jahr 2030 und schließlich auf 250 Euro pro Tonne CO₂ im Jahr 2050 an, jeweils inflationsbereinigt mit Preisbasis des Jahres 2020 (UBA 2020)³. Dieser Kostensatz wird mit den Emissionen der Verkehrsmittel in den drei untersuchten Szenarien multipliziert. Anhand dieser Berechnungen

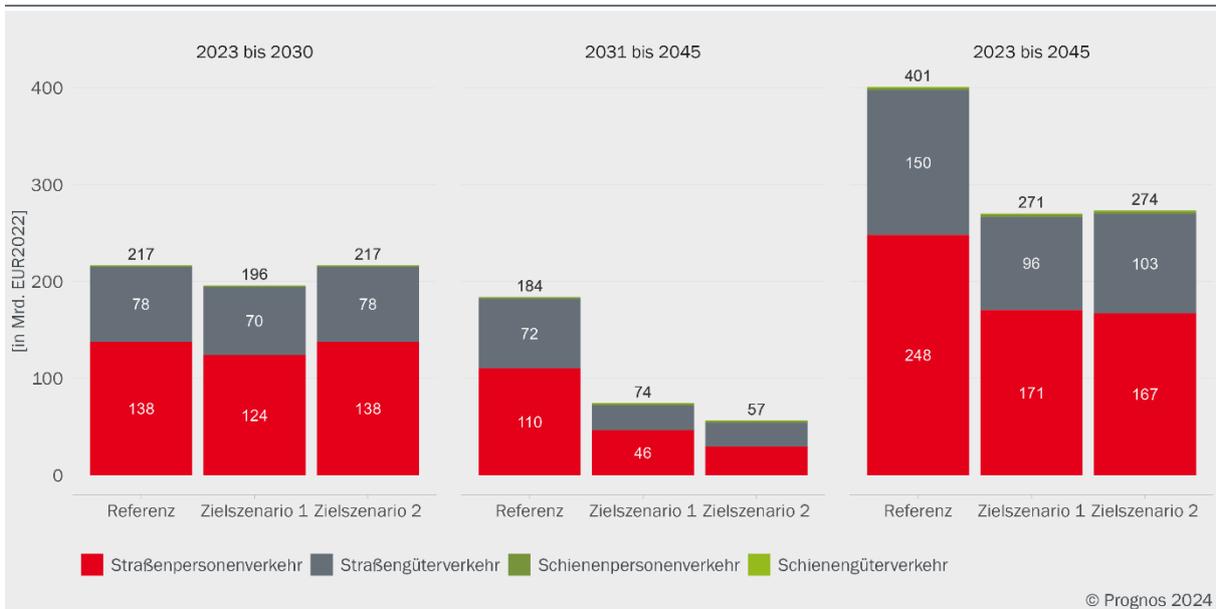
³ Diese Kostensätze mit einer ein-prozentigen reinen Zeitpräferenzrate empfiehlt das UBA bei einer Höhergewichtung der Wohlfahrt heutiger Generationen gegenüber zukünftigen. Bei einer Gleichgewichtung der Wohlfahrt heutiger und zukünftiger Generationen muss von einem deutlich höheren Kostensatz ausgegangen werden.

belaufen sich die Klimakosten im Jahr 2019 auf etwa 30 Mrd. Euro. Trotz eines steigenden Kostensatzes sinken die Klimaschadenskosten in allen betrachteten Szenarien. Das Referenzszenario – wie auch das Zielszenario 2 – zeigt einen Rückgang um 23 Prozent auf 23 Mrd. Euro im Jahr 2030. In Zielszenario 1 sinken die Emissionen im gleichen Zeitraum um 43 Prozent und die Klimaschadenskosten auf 17 Mrd. Euro im Jahr 2030.

Abbildung 22 zeigt die kumulierten Gesamtkosten für Klimaschadenskosten im Personen- und Güterverkehr auf den Verkehrsträgern Straße und Schiene in drei Zeiträumen. Im Zeitraum 2023 bis 2030 sind im Unterschied zu allen anderen Kostenkategorien in allen drei Szenarien zunächst höhere Kosten zu verzeichnen als im anschließenden Zeitraum 2031 bis 2045. Aufgrund der zügigen Umsetzung der Verkehrswende liegen die Klimaschadenskosten in Zielszenario 1 im ersten Zeitraum deutlich unter denen in den beiden anderen Szenarien. Zwischen 2031 und 2045 kommt es in den beiden Zielszenarien zu einem deutlichen Rückgang der Gesamtkosten in diesem Bereich. Die durchschnittlichen jährlichen Kosten gehen im Referenzszenario ebenfalls klar zurück, insgesamt fallen aber dennoch deutlich mehr als doppelt so viele Klimaschadenskosten an wie in den beiden Zielszenarien. Über den gesamten Zeitraum betrachtet liegen die Klimaschadenskosten im Referenzszenario um knapp 30 Prozent über dem Niveau der Kosten in den beiden Zielszenarien. In allen drei Szenarien entfallen rund 60 Prozent der Klimaschadenskosten auf den Straßenpersonenverkehr und zwischen 35 und 40 Prozent auf den Straßengüterverkehr. Der Anteil des öffentlichen Verkehrs an den Klimaschadenskosten ist über den gesamten Betrachtungszeitraum und in allen Szenarien verschwindend gering. Diese Unterschiede verdeutlichen das Potenzial politischer Steuerungsmechanismen zur Förderung umweltfreundlicherer Verkehrsträger und zur Verringerung der umwelt- und gesundheitsschädlichen Auswirkungen des Verkehrs.

Abbildung 22: Klimaschadenskosten - Kosten kumuliert nach Verkehrsmittel

Kumulierte Kosten für die Zeiträume 2023 bis 2030, 2031 bis 2045 und 2023 bis 2045



eigene Abbildung

4 Gesamtergebnisse und Vergleich der Szenarien

Bis Mitte der 2030er Jahre ergeben sich in Zielszenario 1 höhere Ausgaben und Kosten, danach liegen die jährlichen Ausgaben in Zielszenario 1 unter denen des Referenzszenarios. Im gesamten Zeitraum von 2023 bis 2045 liegen die Ausgaben und Kosten in den beiden Szenarien auf vergleichbarem Niveau, während die Ausgaben im Zielszenario 2 um rund 650 Mrd. Euro höher liegen.

Bis 2030 sind in Zielszenario 1 zwar höhere Ausgaben für Fahrzeuge, Personal und Infrastruktur erforderlich, diese werden aber teilweise durch geringere Ausgaben für Energie und Instandhaltung kompensiert. In der langfristigen Betrachtung liegen die jährlichen Ausgaben in Zielszenario 1 insgesamt unter denen des Referenzszenarios, auch wenn über den gesamten Zeitraum die insgesamten Ausgaben in Zielszenario 1 leicht höher sind. Dies verdeutlicht, dass Klimaschutzmaßnahmen nicht nur wirtschaftlich tragbar und umsetzbar sind, sondern dass sich Investitionen in die Mobilitäts- und Antriebswende langfristig auszahlen. Auch in Zielszenario 2 sind die jährlichen Ausgaben langfristig – nach Auslaufen des Pkw-Abwrackprogramms – geringer als im Referenzszenario, allerdings sind die kumulierten Ausgaben und Kosten in Zielszenario 2, das Klimaschutzmaßnahmen im Verkehr erst nach 2030 vorsieht, in der Summe deutlich höher als in den beiden anderen Szenarien. Die Mehrbelastungen resultieren vor allem aus dem modellierten Abwrackprogramm für Pkw und den eingesetzten strombasierten Kraftstoffen.

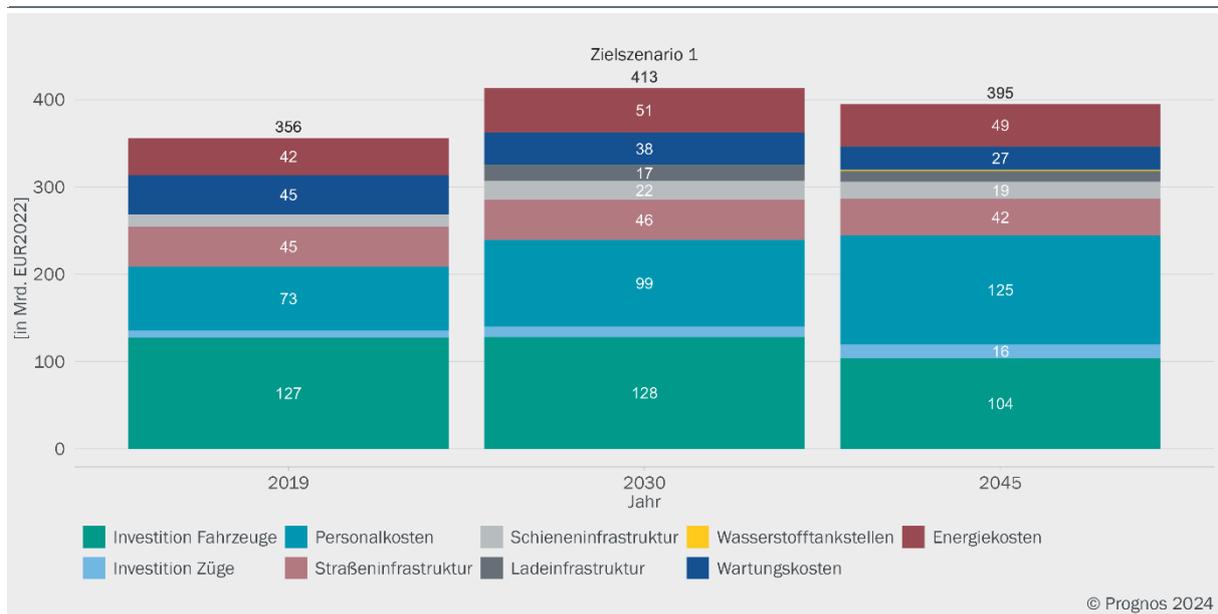
4.1 Ausgaben

Abbildung 23 zeigt die jährlichen realen Ausgaben für das Zielszenario 1 differenziert nach den einzelnen Investitionsbereichen und für die Jahre 2019, 2030 und 2045. Im Jahr 2030 liegen die jährlichen Ausgaben gegenüber 2019 insgesamt um rund 58 Mrd. Euro höher (+ 16 %), wobei die Entwicklung der Ausgaben in den einzelnen Kategorien deutlich unterschiedlich ist. Für Infrastruktur und Personal muss deutlich mehr ausgegeben werden. Aufgrund des aktuell höheren Energiepreinsniveaus liegen auch die Ausgaben für Energie im Jahr 2030 höher als im Jahr 2019. Einsparungen werden bei den Wartungskosten erwartet.

Ohne Berücksichtigung der Klimaschadenskosten liegen die jährlichen Ausgaben im Jahr 2045 zwar unter denen des Jahres 2030, aber immer noch rund 40 Mrd. Euro höher als im Basisjahr 2019. Aufgrund der geringeren Straßenverkehrsnachfrage sinken insgesamt die Ausgaben für Fahrzeuge. Durch die Mobilitätswende sowie die Elektrifizierung des Straßenverkehrs können auch die Ausgaben für Energie langfristig deutlich reduziert werden. Gegenüber 2030 nehmen auch die jährlichen Ausgaben für die Lade- und Schieneninfrastruktur ab, liegen aber immer noch deutlich über dem Niveau von 2019. Langfristig weitere Ausgabensteigerungen werden in Zielszenario 1 bei den Personalkosten erwartet. Insgesamt kommt es mit der Zeit zu einer Abnahme der jährlichen Ausgaben im Verkehrssektor.

Abbildung 23: Struktur der jährlichen Ausgaben in Zielszenario 1

Ausgaben für die Jahre 2019, 2030 und 2045 in Mrd. Euro₂₀₂₂

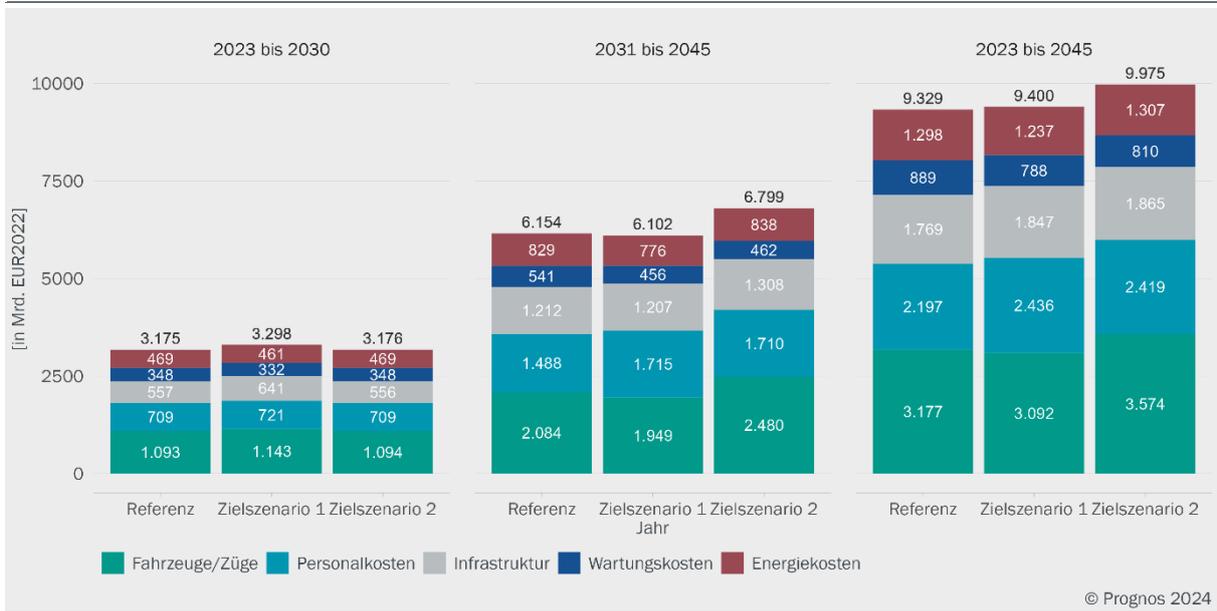


eigene Abbildung

Abbildung 24 zeigt die kumulierten realen Ausgaben pro Szenario und Kostenkategorie in drei Zeiträumen. Bis 2030 wird in Zielszenario 1 etwas mehr investiert als in den beiden anderen Szenarien. Zwischen 2031 und 2045 sind die Ausgaben vor allem in Zielszenario 2 deutlich höher. Über den gesamten Zeitraum betrachtet sind die Ausgaben in Zielszenario 2 am höchsten. Im Vergleich zum Referenzszenario liegen die Gesamtausgaben in Zielszenario 1 auf einem sehr vergleichbaren Niveau. Die Differenz über den gesamten Analysezeitraum von 2023 bis 2045 beträgt rund 70 Mrd. Euro und damit weniger als ein Prozent der Ausgaben.

Abbildung 24: Ausgaben kumuliert nach Kategorien

Kumulierte Ausgaben für die Zeiträume 2023 bis 2030, 2031 bis 2045 und 2023 bis 2045, in Mrd. Euro₂₀₂₂

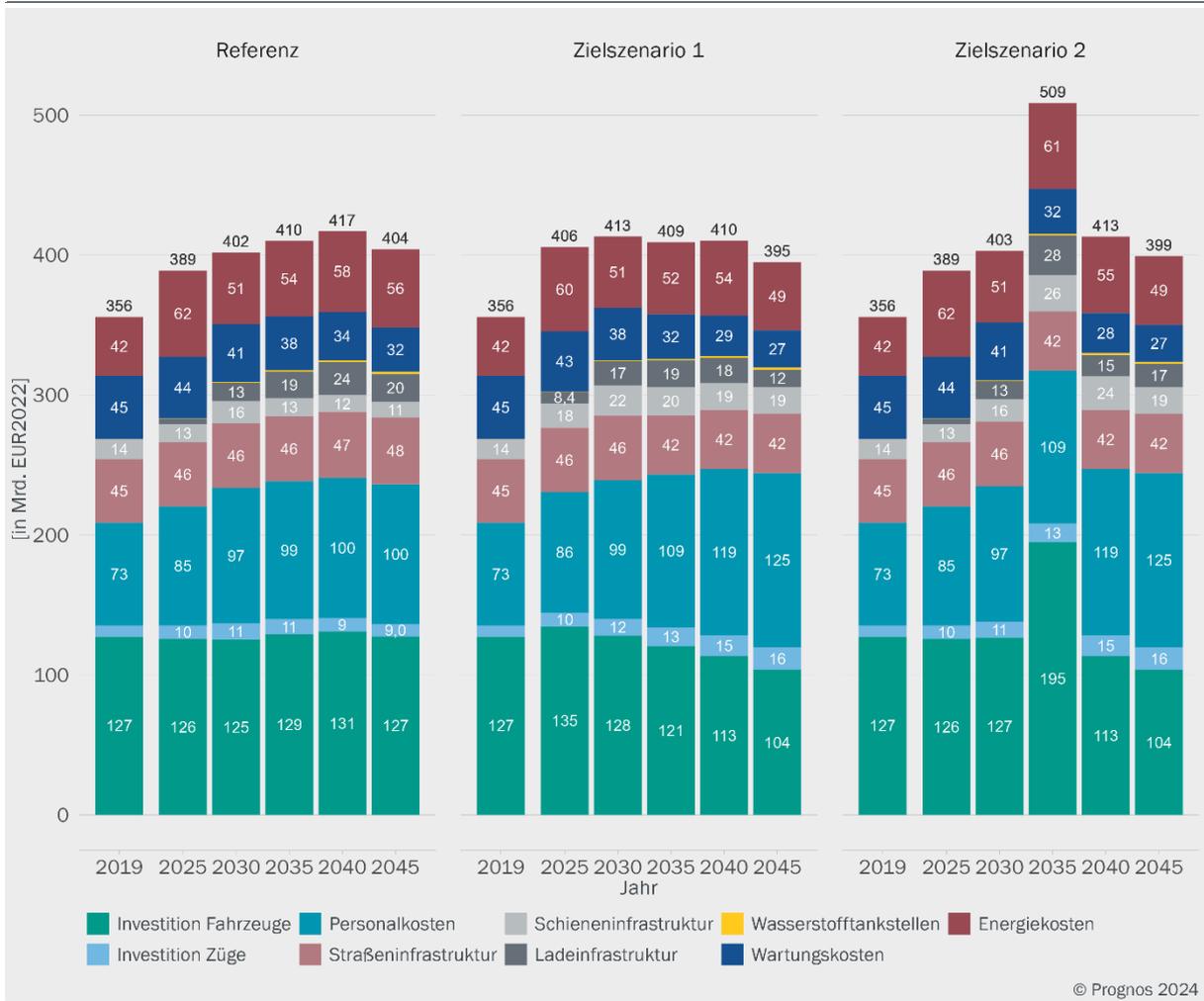


eigene Abbildung

Die folgende Abbildung zeigt die jährlichen Ausgaben differenziert nach den betrachteten Kostenkategorien und Szenarien. Die Ausgaben steigen in allen Szenarien bis 2027 an und sinken dann in Zielszenario 1, während sie im Referenzszenario nach 2030 noch leicht ansteigen. Aufgrund sinkender Ausgaben für Fahrzeuge und Energie wird ab 2040 in allen Szenarien mit sinkenden jährlichen Ausgaben gerechnet. In Zielszenario 2 liegen die jährlichen Ausgaben aufgrund des modellierten Abwrackprogramms für Pkw und dem Einsatz synthetischer Kraftstoffe zwischen 2031 und 2037 um rund 90 bis 100 Mrd. Euro höher als in Zielszenario 1.

Abbildung 25: Jährliche Ausgaben nach Kategorien

Ausgaben für den Zeitraum 2019 bis 2045, in Mrd. Euro₂₀₂₂



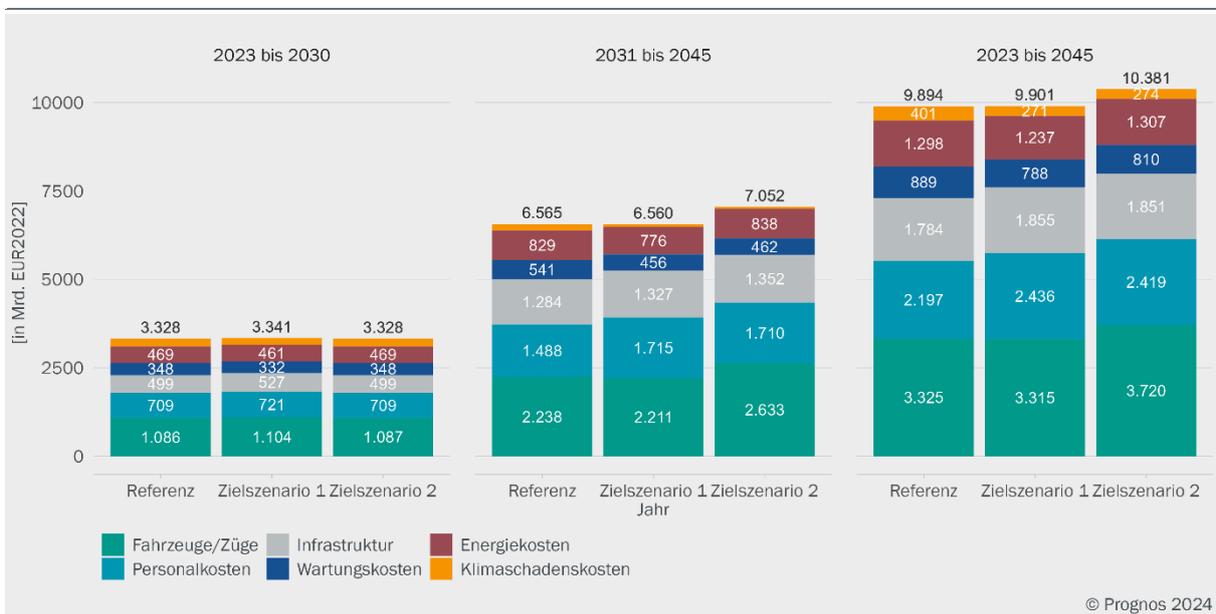
eigene Abbildung

4.2 Kosten

Abbildung 26 zeigt die kumulierten Kosten pro Szenario und Kategorie in drei Zeiträumen. In allen drei Szenarien entfällt der größte Kostenanteil auf Fahrzeuge und Züge. Wie auch bei den Ausgaben machen die Personalkosten den zweitgrößten Anteil vor den Infrastrukturkosten aus. Im Vergleich zu den Ausgaben sind die Gesamtkosten in den Szenarien aufgrund der Verzinsung der CapEx etwas höher. Bei der Berechnung der Kosten wurden auch die externen Klimaschadenskosten berücksichtigt. Diese sind über den gesamten Zeitraum betrachtet im Referenzszenario um etwa 30 Prozent höher als in den beiden Zielszenarien. Der Unterschied ergibt sich vor allem im Zeitraum nach 2030, in dem die externen Klimaschadenskosten in den beiden Zielszenarien deutlich geringer ausfallen.

Abbildung 26: Kosten kumuliert nach Kategorien

Kumulierte Kosten für die Zeiträume 2023 bis 2030, 2031 bis 2045 und 2023 bis 2045, in Mrd. Euro₂₀₂₂

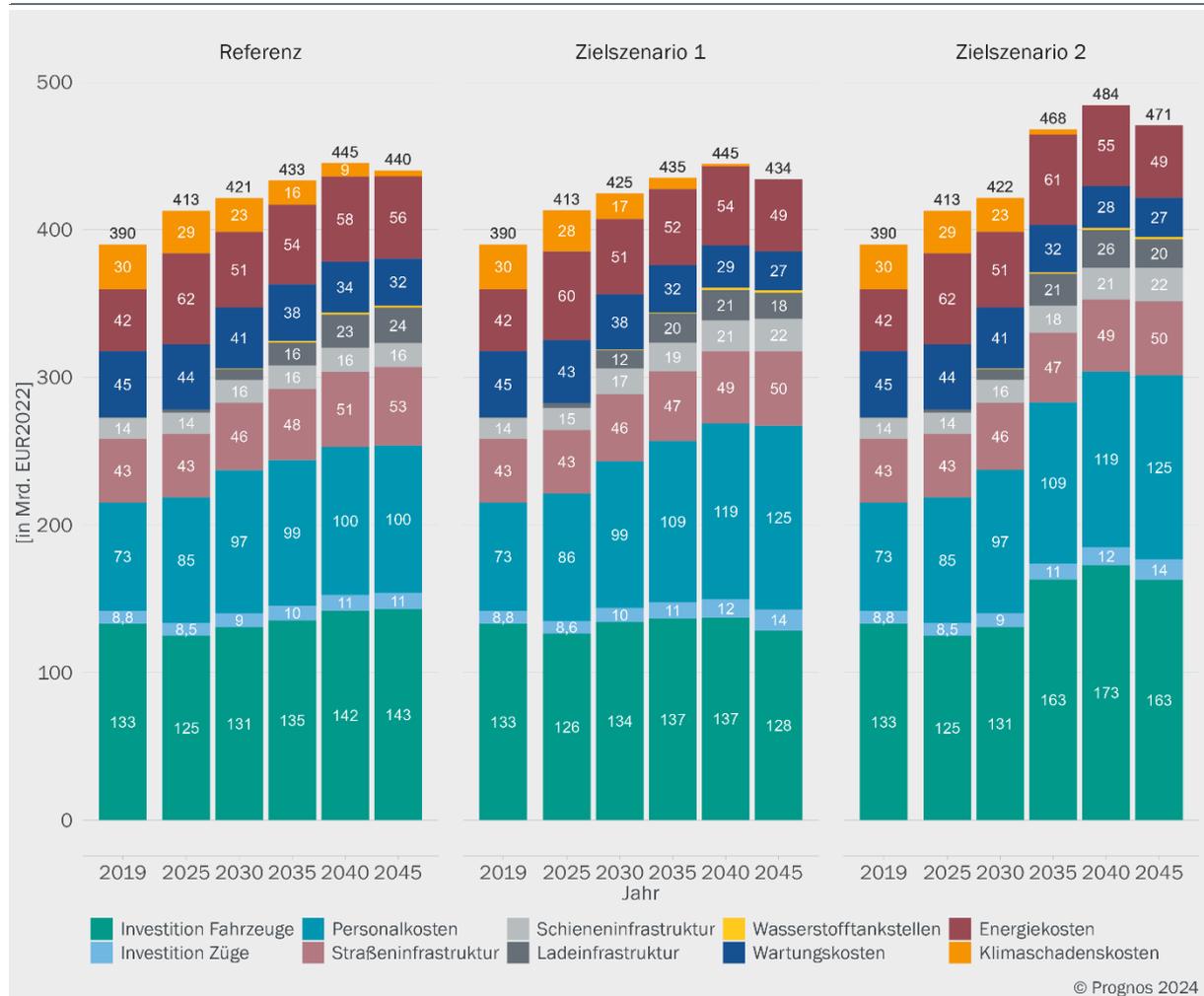


eigene Abbildung

Die folgende Abbildung zeigt die jährlichen Kosten differenziert nach den betrachteten Kostenkategorien und Szenarien. Bis 2040 steigen die Kosten in allen Szenarien noch leicht an. Nach 2040 sinken die jährlichen Kosten in allen Szenarien, wobei der Rückgang in den Zielszenarien stärker ausfällt als im Referenzszenario.

Abbildung 27: Jährliche Kosten nach Kategorien

Kosten für den Zeitraum 2019 bis 2045, in Mrd. Euro₂₀₂₂



eigene Abbildung

4.3 Vergleich der Szenarien

Der direkte Vergleich der Szenarien zeigt sowohl Unterschiede in der Entwicklung der Gesamtausgaben und -kosten als auch in der Struktur der Ausgaben- und Kostenkategorien. Während in Zielszenario 2 und im Referenzszenario die jährlichen Ausgaben ab 2023 auf einem ähnlichen Niveau bleiben, steigen die Kosten in Zielszenario 1 in der laufenden Dekade deutlich an. Im Jahr 2027 steigen die jährlichen Ausgaben in Zielszenario 1 real auf 445 Mrd. Euro, das sind rund 17 Mrd. Euro oder rund 4 Prozent mehr als im Jahr 2023. Auch gegenüber dem Referenzszenario liegen die realen Ausgaben in Zielszenario 1 im Jahr 2027 um rund 19 Mrd. Euro oder 4,5 Prozent höher. Bis zum Jahr 2030 können die jährlichen realen Ausgaben in Zielszenario 1 auf 431 Mrd. Euro reduziert werden und damit liegen sie dann nur noch rund 2,7 Mrd. Euro oder 0,6 Prozent über dem Wert von 2023.

Die Ausgaben und Kosten für die **Infrastruktur** fassen die Kategorien Lade-, Straßen- und Schieneninfrastruktur zusammen. Aufgrund der zügigen Elektrifizierung des Straßenverkehrs steigen die Kosten für die Ladeinfrastruktur in Zielszenario 1 in den nächsten Jahren stärker an als in

den Szenarien Referenz und Ziel 2. Langfristig liegen die jährlichen Ausgaben für die private und öffentliche Ladeinfrastruktur in Zielszenario 1 jedoch unter denen der Referenz und auch unter denen des Zielszenarios 2, da in Zielszenario 1 Investitionen vorgezogen werden beziehungsweise aufgrund der Mobilitätswende weniger Pkw - und damit auch weniger Elektrofahrzeuge - unterwegs sind. Nach 2030 wird in den Zielszenarien kein weiterer Ausbau der Bundesfernstraßen unterstellt - entsprechend sind die jährlichen realen Ausgaben im Bereich der Straßeninfrastruktur um rund 4 Mrd. Euro niedriger als im Referenzszenario. Im Bereich der Schieneninfrastruktur ist das Zielszenario 1 bis 2030 und beide Zielszenarien bis 2045 deutlich teurer als das Referenzszenario. So liegt das Zielszenario 1 bei den Infrastrukturausgaben ab 2024 deutlich über dem Referenzszenario und dem Zielszenario 2. Ab 2038 liegen die jährlichen Infrastrukturausgaben nach den Berechnungen dieser Studie in Zielszenario 1 unter denen des Referenzszenarios.

Die Ausgaben und Kosten für die **Fahrzeuge und Züge** zeigen deutliche Unterschiede in Bezug auf die notwendigen Investitionen in den Straßen- beziehungsweise Schienenverkehr. Aufgrund der Mobilitätswende und der damit verbundenen Verlagerung von Straßenverkehr auf die Schiene sind die Ausgaben für Fahrzeuge in Zielszenario 1 langfristig niedriger als im Referenzszenario. Über den gesamten Betrachtungszeitraum sind die Kosten und Ausgaben für Fahrzeuge in Zielszenario 2 mit Abstand am höchsten. Dies ist auf das modellierte Abwrackprogramm zurückzuführen, das in Zielszenario 2 in den Jahren 2031 bis 2037 zu höheren Pkw-Ausgaben führt. Demgegenüber sind die Ausgaben für Züge im Personen- und Güterverkehr in Zielszenario 1 am höchsten. In allen drei Szenarien entfällt der größte Teil der Kosten und Ausgaben auf den Straßenpersonenverkehr. Der Anteil der Kosten und Ausgaben für den Schienenverkehr an den kumulierten Kosten und Ausgaben über den gesamten Betrachtungszeitraum ist im Vergleich zum Anteil der Ausgaben für den Straßenverkehr relativ gering. Durch die relativ konstante Entwicklung der realen Ausgaben bei den Straßenfahrzeugen liegen die Kosten aufgrund der Verzinsung über den Ausgaben. Bei den Schienenfahrzeugen wird vor allem in den Zielszenarien ein starker Anstieg der Ausgaben im Zeitverlauf erwartet, was angesichts der langen Nutzungsdauer zu niedrigeren kumulierten Kosten im Vergleich zu den kumulierten Ausgaben führt.

Auch die Entwicklung der **Energiekosten** zeigt deutlich die Unterschiede in den Szenarien. Insgesamt liegen die Energiekosten im Referenzszenario über den gesamten Betrachtungszeitraum über denen des Zielszenarios 1. Die Unterschiede zwischen den Szenarien liegen zum einen in der modellierten Entwicklung der Verkehrsleistung auf den beiden Verkehrsträgern Schiene und Straße sowie in der Entwicklung der Antriebswende begründet. Insgesamt sinken die Energieträgerkosten bis 2030 zwar in allen drei Szenarien, jedoch fallen die Kostenreduktionen bei den fossilen Kraftstoffen im Referenz- und Zielszenario 2 geringer aus als in Zielszenario 1. Hinzu kommt, dass die Energieträgerkosten in Zielszenario 2 aufgrund der Beimischung von strombasierten Kraftstoffen nach 2030 deutlich höher ausfallen. In Zielszenario 1 hingegen fallen die Stromkosten aufgrund der schnelleren Elektrifizierung der Pkw- und Lkw-Flotte höher aus bis 2030. Durch die Mobilitätswende und die damit verbundene Stärkung des Schienenverkehrs kommt es zu etwas höheren Energiekosten im Personen- und Güterverkehr auf der Schiene, gleichzeitig aber zu einer deutlich stärkeren Reduktion der Energiekosten im Straßenverkehr durch die geringere Verkehrsleistung auf der Straße.

Die **Personalkosten** sind in den beiden Zielszenarien aufgrund der stärkeren Verlagerung von der Straße auf die Schiene mit über 200 Mrd. Euro Differenz deutlich höher als im Referenzszenario. Allen drei Szenarien ist jedoch gemeinsam, dass der Straßenverkehr – genauer der Straßengüterverkehr – deutlich höhere Personalkosten verursacht als der Schienenverkehr. Im öffentlichen Personenverkehr hat vor allem der Busverkehr den größten Anteil an den Personalkosten. Bis zum Jahr 2030 fallen vor allem in Zielszenario 1 bedingt durch eine stärkere modale Verlagerung

von der Straße auf die Schiene beziehungsweise vom individuellen Verkehr in den öffentlichen Verkehr mehr Personalkosten an als in den beiden anderen Szenarien. Weiterhin ist festzustellen, dass die Personalkosten im Schienengüterverkehr im Vergleich zum Lkw relativ gering sind. Hier zeigt sich die Personalkosteneffizienz des Schienen- gegenüber dem Straßengüterverkehr. Durch die Verlagerung auf die Schiene können somit bei Güterverkehr insgesamt Personalkosten eingespart werden.

Tabelle 25: Gesamtergebnis im Szenarienvergleich

Kumulierte Kosten und Ausgaben 2019 bis 2045 im Referenzszenario und Differenzen zu den Zielszenarien nach Bereichen und Verkehrsträgern in Mrd. Euro₂₀₂₂

in Mrd. Euro (real, 2022)	AUSGABEN			KOSTEN		
	Referenz	Ziel 1 - Ref	Ziel 2 - Ref	Referenz	Ziel 1 - Ref	Ziel 2 - Ref
Infrastruktur	1.769	79	96	1.784	71	67
Straße	1.446	-74	-56	1.424	1,6	12
Schiene	322	152	152	360	69	55
Fahrzeuge/Züge	3.177	-85	397	3.325	-10	395
Straße	2.946	-150	336	3.097	-30	378
Schiene	231	65	61	228	20	17
Energiekosten	1.298	-61	9,2	Ausgaben = Kosten		
Straße	1.222	-81	-10			
Schiene	76	21	19			
Personalkosten	2.197	239	222	Ausgaben = Kosten		
Straße	1.951	160	148			
Schiene	246	79	74			
Wartungskosten	889	-101	-79	Ausgaben = Kosten		
Straße	889	-101	-79			
Ergebnis	9.329	71	645	9.492	138	615
Externe Klimaschadenskosten				401	-131	-128
Straße				398	-131	-128
Schiene				3,3	0,2	0,3
Ergebnis inkl. externe Klimaschadenskosten				9.894	7,5	487

Quelle: Prognos AG

eigene Tabelle

Die **Wartungskosten** hängen von der Fahrleistung der Straßenfahrzeuge ab. Bei Elektrofahrzeugen sind die spezifischen Wartungskosten geringer als bei Verbrennungsmotoren. Aufgrund des höheren Elektrifizierungsgrades und der geringeren Fahrleistung in den Zielszenarien ist auch mit geringeren Wartungskosten zu rechnen.

Für das Jahr 2019 belaufen sich die externen **Klimaschadenskosten** auf rund 30 Mrd. Euro. Aufgrund der Emissionsentwicklung sinken die Klimaschadenskosten in allen betrachteten Szenarien. Im Referenzszenario – wie auch in Zielszenario 2 – zeigt sich ein Rückgang um 23 Prozent auf 23 Mrd. Euro im Jahr 2030. In Zielszenario 1 sinken die Emissionen im gleichen Zeitraum um 43 Prozent und die Klimaschadenskosten auf 17 Mrd. Euro im Jahr 2030. Kumuliert über den gesamten Betrachtungszeitraum sind die Klimaschadenskosten in beiden Zielszenarien um rund

130 Mrd. Euro niedriger als im Referenzszenario. Die Einsparungen werden vor allem im Straßenverkehr erzielt, da der Schienenverkehr grundsätzlich nur einen sehr geringen Anteil an den Klimaschadenskosten hat.

Die **Kosten** sind in den beiden Zielszenarien höher als im Referenzszenario, allerdings mit deutlichen Unterschieden zwischen den beiden Zielszenarien. In Zielszenario 1 belaufen sich die Mehrkosten auf knapp 140 Mrd. Euro (+1,5 %) beziehungsweise bei Berücksichtigung der externen Klimaschadenskosten nur noch auf rund 8 Mrd. Euro (+0,08 %). In Zielszenario 2 belaufen sich die Mehrkosten gegenüber dem Referenzszenario bei über 600 Mrd. Euro (+6,5 %) und selbst bei Berücksichtigung der externen Klimaschadenskosten noch bei knapp 500 Mrd. Euro (+4,9 %). Über den gesamten Betrachtungszeitraum von 2019 bis 2045 liegen die **Ausgaben** in Zielszenario 1 auf dem Niveau des Referenzszenarios. In Zielszenario 2 ergeben sich dagegen Mehrausgaben von knapp 650 Mrd. Euro (+6,9 %).

5 Fazit

Die Verkehrswende ist ein unverzichtbarer Bestandteil der nationalen und europäischen Bestrebungen, bis 2045 einen klimaneutralen Verkehr zu erreichen. Ein zentrales Ergebnis der Szenarienanalyse zur Verkehrswende ist, dass signifikante Einsparungen von Treibhausgasemissionen grundsätzlich ohne Mehrkosten für die Gesellschaft möglich sind. Zwar ist die Erreichung der Klimaziele mit höheren Kosten für Schieneninfrastruktur, Elektrofahrzeuge oder Personal im öffentlichen Verkehr verbunden. Dem stehen jedoch insgesamt geringere Ausgaben für Energie, Straßenfahrzeuge insgesamt, Wartungskosten und nicht zuletzt geringere Belastungen durch Klimaschadenskosten des Verkehrs gegenüber.

Eine rasche und entschlossene Umsetzung der Verkehrswende, die bereits in den nächsten Jahren beginnt und klare politische Maßnahmen beinhaltet, verspricht nicht nur die Einhaltung der gesetzlichen Klimaziele, sondern führt mittel- und langfristig auch zu volkswirtschaftlichen Kostenvorteilen. Anfängliche Mehrinvestitionen in den öffentlichen Verkehr und in klimafreundlichere Verkehrsmittel werden langfristig durch Effizienzgewinne und sinkende Gesamtkosten des Verkehrssystems überkompensiert. Verzögertes Handeln bei der Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen birgt hingegen die Gefahr, dass die Klimaneutralität nur noch durch teure, kurzfristig wirkende Maßnahmen noch erreicht werden kann. Dies hätte nicht nur höhere volkswirtschaftliche Kosten, sondern auch einen abrupten Strukturwandel und die Entwertung vorhandenen Kapitals zur Folge. Der Zwang, größere Emissionsreduktionen in kürzerer Zeit zu erreichen, könnte zudem zu sozialen und wirtschaftlichen Verwerfungen führen und birgt damit ein größeres Risiko als sofortiges politisches Handeln.

Ein wesentlicher Aspekt der Studie ist die Bedeutung von klaren und konsistenten politischen Rahmenbedingungen. Eine konsequente und vorausschauende Politik schafft Investitionssicherheit für Unternehmen und andere Akteure im Verkehrssektor. Durch eine klare Linie in der Verkehrspolitik, die konkrete und verbindliche Maßnahmen und Zeitpläne umfasst, können Investoren und Unternehmen ihre Ressourcen effektiver planen und einsetzen. Dies führt nicht nur zu einer effizienteren Kapitalallokation, sondern auch zur schnelleren Realisierung von Projekten, die für die Erreichung der Klimaziele essentiell sind.

Entscheidend für das Gelingen der Verkehrswende ist, dass neben der Antriebswende auch eine umfassende Mobilitätswende angestrebt wird. Die Stärkung des Schienenverkehrs, des öffentlichen Straßenverkehrs sowie die verstärkte Nutzung aktiver Mobilitätsformen sind unabdingbar, um die Emissionen deutlich zu reduzieren. Voraussetzung dafür ist unter anderem die Schaffung entsprechender infrastruktureller Grundlagen. Die Verkehrswende erfordert politische Maßnahmen, die sowohl die Elektrifizierung des Verkehrs als auch die Verlagerung von der Straße auf die Schiene vorantreiben. Diese Maßnahmen sind kurzfristig mit Mehrausgaben verbunden, haben aber das Potenzial, langfristig zu Kosteneinsparungen zu führen. Zudem bietet eine erfolgreiche Umsetzung der Verkehrswende neben dem Klimaschutz auch das Potenzial, die Lebensqualität in urbanen Räumen zu verbessern, sei es durch weniger Verkehrslärm, weniger gesundheitsschädliche Luftschadstoffemissionen oder das Potenzial, öffentliche Räume lebenswerter zu gestalten. Die Politik steht daher in den nächsten Jahren vor der Aufgabe, auf den verschiedenen administrativen Ebenen durch klare Vorgaben und unterstützende Rahmenbedingungen die Weichen für eine erfolgreiche Transformation des Verkehrssektors zu stellen.

Quellenverzeichnis

ADAC (2024): ADAC Autokatalog: Aktuelle News und Autodatenbank. <https://www.adac.de/rundums-fahrzeug/autokatalog/>

Agentur für Arbeit (2024): Berufe auf einen Blick. <https://statistik.arbeitsagentur.de/DE/Navigation/Statistiken/Interaktive-Statistiken/Berufe-auf-einen-Blick/Berufe-auf-einen-Blick-Anwendung-Nav.html;jsessionid=B0893533065BB3EED9CE6FC1315C7529>

Agora Verkehrswende (2022): Schnellladen fördern, Wettbewerb stärken. Finanzierungsmodelle für den Aufbau von öffentlich zugänglicher Ladeinfrastruktur für Pkw. https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2022/Ladeinfrastruktur/Agora-Verkehrswende_Schnellladen-foerdern-Wettbewerb-staerken.pdf

BFE (2023): Verständnis Ladeinfrastruktur 2050 Wie lädt die Schweiz in Zukunft? <https://www.newsd.admin.ch/newsd/message/attachments/78058.pdf>

BloombergNEF (2023): Lithium-Ion Battery Pack Prices Hit Record Low of \$139/kWh. <https://about.bnef.com/blog/lithium-ion-battery-pack-prices-hit-record-low-of-139-kwh/>

BMDV (2016): Bundesverkehrswegeplan 2030. https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/bundesverkehrswegeplan-2030-gesamtplan.pdf?__blob=publicationFile

BMDV (2021a): Berechnung der Wegekosten für das Bundesfernstraßennetz sowie der externen Kosten nach Maßgabe der Richtlinie 1999/62/EG für die Jahre 2023 bis 2027. https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/StV/wegekostengutachten-2018-2022-endbericht.pdf?__blob=publicationFile

BMDV (2021b): Nationaler Radverkehrsplan 3.0. <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/StV/Radverkehr/nationaler-radverkehrsplan-3-0.html>

BNetzA (2024): Elektromobilität - Öffentliche Ladesäuleninfrastruktur. <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/E-Mobilitaet/start.html>

Böttger C (2021): Abschätzung der Kosten der Verkehrsträger im Vergleich. <https://www.htw-berlin.de/forschung/online-forschungskatalog/publikationen/publikation/?eid=13646>

bpb (2022): Zur Geschichte der Klimapolitik in Deutschland. <https://www.bpb.de/themen/klimawandel/dossier-klimawandel/515969/zur-geschichte-der-klimapolitik-in-deutschland/>

Bundesministerium der Finanzen (2024): Bundeshaushalt digital. <https://www.bundeshaushalt.de/DE/Bundeshaushalt-digital/bundeshaushalt-digital.html>

Bundesregierung (2023a): Ein klares Bekenntnis zur Schiene. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/schienengipfel-2023-2223896>

Bundesregierung (2023b): So funktioniert die Förderung des Radverkehrs. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/nachhaltigkeitspolitik/radverkehrsfoerderung-2173328>

Bünger P, Herrberg H, Lübker M (2023): Was verdienen Berufskraftfahrer/innen im Güterverkehr? Eine Analyse auf Basis der WSI-Lohnspiegel-Datenbank. <https://www.lohnspiegel.de/berufskraftfahrer-13917.htm>

DB (2023): Deutsche Bahn Integrierter Bericht 2022. https://ir.deutschebahn.com/fileadmin/Deutsch/2023/Berichte/DB_IB22_d.pdf

DB (2024): Bund und DB legen 40 Streckenabschnitte für Generalsanierung bis 2030 fest. https://www.deutschebahn.com/re-source/blob/11344496/93ac55503a77067bf9ab24b26f051612/20230915_Faktenblatt_Bund-und-DB-legen-Streckenabschnitte-fuer-Generalsanierung-fest-data.pdf

dena (2021): Pkw-Antriebe für die Zukunft: Ökonomische, ökologische und technische Effizienz im Vergleich. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/effizienzstudie-pkw.pdf?__blob=publicationFile&v=18

Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung (2021): Volkswirtschaftliche Bedeutung des deutschen Bahnsektors auf Grundlage der Beschäftigungswirkung. https://www.allianz-pro-schiene.de/wp-content/uploads/2021/06/210618_DZSF_ForBe-14-BeschaeftWirk-Kurzf.-2021-06-18b-002.pdf

Die Zeit (2024): CO₂-Ausstoß: Ampel einigt sich auf Reform des Klimaschutzgesetzes. Hamburg. <https://www.zeit.de/politik/deutschland/2024-04/ampel-einigt-sich-auf-reform-des-klimaschutzgesetzes>

Difu (2023): Investitionsbedarfe für ein nachhaltiges Verkehrssystem. <https://repository.difu.de/handle/difu/57>

e-mobil BW (2017): Nullemissionsnutzfahrzeuge Vom ökologischen Hoffnungsträger zur ökonomischen Alternative. <https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/NFZ-Studie.pdf>

Europäische Kommission DG Move (2020): Handbook on the external costs of transport: version 2019 – 1.1. Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2832/51388>

Europäisches Parlament, Europäischer Rat (2023): Verordnung des europäischen Parlaments und des Rates über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe und zur Aufhebung der Richtlinie 2014/94/EU

FAZ (2023): Ampel will 45 Milliarden Euro in das Schienennetz investieren.

Fraunhofer ISI, Öko-Institut e.V., ifeu (2021): Infrastruktur für Elektro-Lkw im Fernverkehr. Hochleistungsschnelllader und Oberleitung im Vergleich – ein Diskussionspapier. https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2021/BOLD_Truck_charging_discussion%20paper.pdf

Gössling S, Choi A, Dekker K, Metzler D (2019): The Social Cost of Automobility, Cycling and Walking in the European Union

H2 Mobility (2023): H2.LIVE: Wasserstofftankstellen in Deutschland & Europa. <https://h2.live/>

Handelsblatt (2024): Brutto-Netto-Rechner 2024 | Gehaltsrechner | Lohnrechner. <https://www.handelsblatt.com/brutto-netto-rechner/>

icct (2023): A total cost of ownership comparison of truck decarbonization pathways in Europe. <https://theicct.org/wp-content/uploads/2023/11/ID-54-%E2%80%93-EU-HDV-TCO-paper-working-paper-28-A4-50145-v2.pdf>

IEA (2019): The Future of Hydrogen. IEA, Paris. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>

IEA (2020): IEA G20 Hydrogen report: Assumptions - Revised version. https://iea.blob.core.windows.net/assets/29b027e5-fefc-47df-aed0-456b1bb38844/IEA-The-Future-of-Hydrogen-Assumptions-Annex_CORR.pdf

Infras (2019): Externe Kosten des Verkehrs in Deutschland. https://www.infras.ch/media/filer_public/b0/c9/b0c9923c-199c-4642-a235-9e2440f0046a/190822_externe_kosten_verkehr_2017.pdf

Ludwig-Bölkow-Stiftung, ADAC Stiftung (2019): Infrastrukturbedarf E-Mobilität Analyse eines koordinierten Infrastrukturaufbaus zur Versorgung von Batterie- und Brennstoffzellen-Pkw in Deutschland. https://lbst.de/wp-content/uploads/2021/03/ADAC-Stiftung_Infrastrukturstudie_Abschlussbericht_final.pdf

Müller S (2021): Digitalisierung und der Schienengüterverkehr – Eine innovationsökonomische Perspektive auf den digitalen Güterwagen. https://elib.dlr.de/142203/1/29_33_Mueller_FA.pdf

Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur (2020): Ladeinfrastruktur nach 2025/2030: Szenarien für den Markthochlauf. Berlin. <https://nationale-leitstelle.de/wp-content/pdf/broschuere-lis-2025-2030-final.pdf>

NOW (2022): Programmbegleitforschung Innovative Antriebe und Fahrzeuge. https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2022/04/NOW_Abschlussbericht_Begleitforschung-Bus.pdf

Prognos AG (2024): Energiepreisprojektion (interne Datenbank)

Prognos AG, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2021): Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2021/KNDE_2045_Langfassung/Klimaneutrales_Deutschland_2045_Langfassung.pdf

pwc, Prognos AG et. al. (2024): Begleituntersuchung zur Förderung von Elektrobussen im ÖPNV

Ramboll (2023): Ermittlung des Finanzbedarfs für den ÖPNV bis 2031. https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/K/update-oePNV-finanzierung-bmdv-summary.pdf?__blob=publicationFile

Roland Berger, VDV (2021a): Schienengüterverkehr als Garant des Klimaschutzes im Verkehr – Qualität, Innovation und Kunden im Fokus. München. <https://www.vdv.de/schienengueterverkehr-als-garant-des-klimaschutzes.aspx>

Roland Berger, VDV (2021b): Verkehrswende gestalten – Leistungsstark & nachhaltig, Gutachten über die Finanzierung von Leistungskosten der öffentlichen Mobilität. <https://www.vdv.de/rb-pub-vdv-leistungskostengutachten-adj.210924-ds.pdf>

Swiss eMobility (2023): Ladeinfrastruktur in Mietobjekten Ein Leitfaden für Eigentümerschaften und Verwaltungen. https://www.swiss-emobility.ch/de/Publikationen/2023-06-28_Laden-Punkt_Leitfaden-MPG_DE.pdf

UBA (2020): Methodenkonvention 3.1 zur Ermittlung von Umweltkosten. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-12-21_methodenkonvention_3_1_kostensaetze.pdf

UBA (2023a): Gesellschaftliche Kosten von Umweltbelastungen. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-wirtschaft/gesellschaftliche-kosten-von-umweltbelastungen#umweltkosten-des-verkehrs>

UBA (2023b): Projektionsbericht 2023 für Deutschland. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11740/publikationen/2023_08_21_climate_change_39_2023_projektionsbericht_2023_0.pdf

UBA (2024a): Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Sektoren. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energetraegern-sektoren>

UBA (2024b): Klimaschutz im Verkehr. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr/klimaschutz-im-verkehr>

UBA (2024c): Treibhausgas-Projektionen 2024. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/thg-projektionen_2024_ergebnisse_kompakt_v3.pdf

Zapp K (2018): Das Ziel klar im Blick Der Weg führt über Telematik und Digitalisierung zur Automatisierung von Prozessen im Schienengüterverkehr. https://www.eurailpress.de/fileadmin/user_upload/RBS-Spezial_Gueterbahnen_Mai_2018_Zapp.pdf

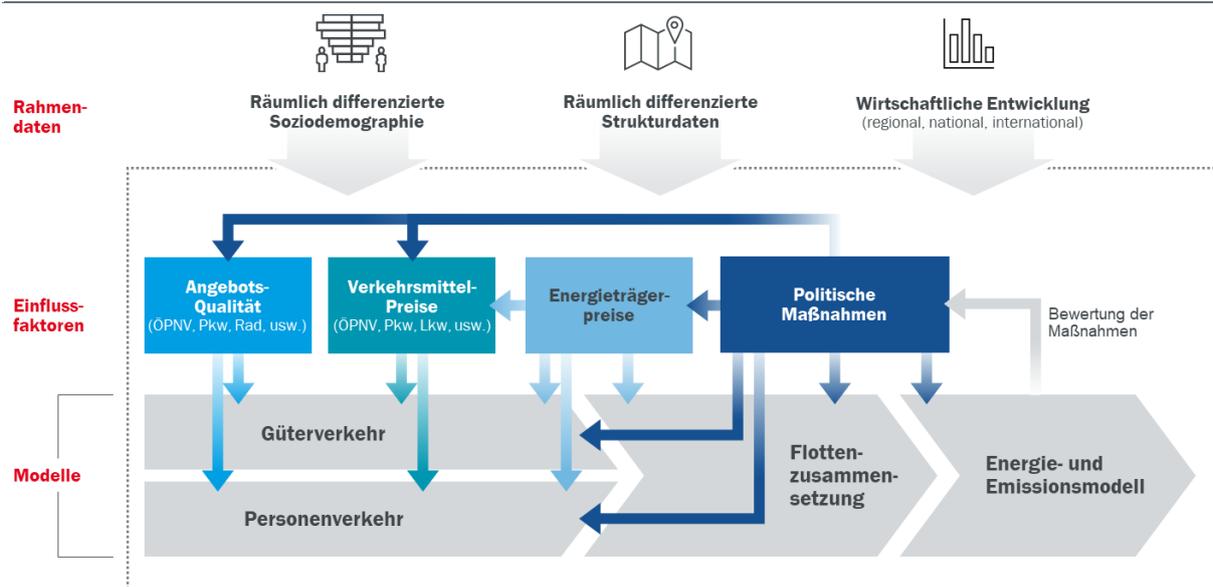
Anhang – Modellbeschreibung TEMPO

Für die Analyse und Fortschreibung des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen im Verkehrssektor werden drei Modelle verwendet: das Verkehrsmengenmodell, Flottenmodelle sowie ein Modell für die Berechnung der Endenergie und der Emissionen für den Sektor Verkehr.

Im Verkehrsmengenmodell wird, ausgehend von sozioökonomischen Rahmendaten wie der Bevölkerung nach Alter und der Wirtschaftsleistung, das Mobilitätsverhalten im Personenverkehr und die Nachfrage im Güterverkehr abgebildet. Leitvariablen zur Bestimmung der Verkehrsleistungen im Personen- und Güterverkehr sind Veränderungen im *Modal Split* zwischen den Verkehrsträgern und Veränderungen der Belegungskennziffern (Personenverkehr) beziehungsweise Auslastungsgrade (Güterverkehr). Ergebnis ist die Entwicklung der Verkehrsmengen, differenziert nach Verkehrsart (Personen-/Güterverkehr) und Verkehrsträgern (Straße, Schiene, Luft und Wasser).

Abbildung 28: TEMPO-Schema

Modellschema für TEMPO: Rahmendaten, Einflussfaktoren und Modelle



| eigene Abbildung

Im Straßenverkehr werden Verkehrsleistungen, Fahrleistungen, Neuzulassungen und Bestände nach Verkehrszweigen (Pkw, motorisierte Zweiräder, Omnibusse, Lkw etc.) modelliert. Im Schienen- und Luftverkehr sowie in der Schifffahrt wird die Verkehrsleistung weiter in Verkehrszweige differenziert.

Personenverkehr

Für die Analyse des Personenverkehrs wird zunächst die Anzahl der zurückgelegten Wege pro Person und Altersgruppe untersucht. Diese Daten werden anschließend unter Berücksichtigung der demografischen Entwicklung fortgeschrieben. Um die Verkehrsleistung zu berechnen, werden die durchschnittlichen Wegelängen herangezogen. Die Fahrleistung der Pkw wird anhand des durchschnittlichen Besetzungsgrades je nach Fahrtzweck ermittelt.

Basis der Personenverkehrsprognose ist die altersjahresscharfe Entwicklung der Bevölkerung auf Kreisebene. Die Datenbasis der Pro-Kopf-Mobilität (Anzahl Wege pro Kopf) nach Wegezwecken und Verkehrsmitteln lieferte die Statistikreihe *Verkehr in Zahlen* sowie die Verkehrserhebung *Mobilität in Deutschland 2017*. Die durchschnittliche Anzahl der Wege pro Kopf sowie die Berechnung des Wegeaufkommens nach Wegezwecken wurde unter Berücksichtigung der Altersstruktur auf Kreisebene gerechnet. Der *Modal Split* ergibt sich in Abhängigkeit des Wegezweckes und Raumtyps. Die Datengrundlage der durchschnittlichen Wegelänge nach Verkehrsmitteln und Wegezwecken bildet die Statistikreihe *Verkehr in Zahlen 2022/23*. Die Entwicklung der Wege mit den Wegezwecken „Arbeit“ und „Dienstlich“ ist an die *Erwerbstätigenprognose des Statistischen Bundesamtes, Variante 2* gekoppelt.

Tabelle 26: Überblick – Verwendete Datenquellen für das Personenverkehrsmodell

Quelle	Bezeichnung	Beschreibung	Verwendung
BBSR (2021)	Bevölkerungsprognose 2040	Altersjahresscharfe Entwicklung der Bevölkerung auf Kreis-	Grundlage der Fortschreibung des Gesamtaufkommens
BMDV (2023)	Verkehr in Zahlen 2022/23	Personenverkehr nach Verkehrsbereichen sowie Personenverkehr – motorisierter und nicht motorisierter Verkehr	Berechnung des Aufkommens und der Leistung nach Wegezwecken und Verkehrsmitteln sowie der Fahrleistung im MIV
DLR (2008 u. 2017)	Mobilität in Deutschland	Wege nach Alter, Anteil Hauptzweck des Weges nach Alter, Anteil Wege nach Hauptverkehrsmittel u. Raumtyp (7 Kat.)	Berechnung des Aufkommens und der Leistung nach Raumtypen, Wegezwecken und Verkehrsmitteln
Destatis (2020 u. 2021)	15. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung, Erwerbspersonenvorausberechnung	Entwicklung der Bev. und der Erwerbsquoten nach Alter und Geschlecht in Deutschland bis 2060, Var. 2 (W2-EQ1)	Grundlage der Wege mit den Wegezwecken „Arbeit“ und „Dienstlich“
Vritic M.(o.J.)	Elastizitäten der Personenverkehrsnachfrage (Schweiz). ETH Zürich.	Empfohlene Verkehrsnachfrageelastizitäten	Grundlage Preisentwicklung ÖPNV und ÖSPV Nahverkehr
ADAC (2021)	ÖPNV-Ticketvergleich: Gewaltige Preisunterschiede	Durchschnittliche Kosten eines Monatstickets in Deutschland (vor Einführung des 49-Euro-Tickets)	Grundlage Preisentwicklung ÖPNV und ÖSPV Nahverkehr

eigene Tabelle

Güterverkehr

In diesem Modell wird der Güterverkehr in 20 verschiedene Gütergruppen unterteilt. Die Modellierung der Entwicklungen im Güterverkehr erfolgt ähnlich zum Personenverkehr in drei Schritten: Zunächst wird das Aufkommen (Tonnen) nach Güterkategorie berechnet und anhand von branchenspezifischen Leitdaten prognostiziert, daraus wird die Verkehrsleistung (Tkm) und schließlich die Fahrleistung (Fztkm) ermittelt. Die Berechnungen erfolgen jeweils differenziert nach Verkehrsträger (Straße, Schiene und Wasser), Verkehrsart (Binnenverkehr, Import, Export, Transit) und 20 Gütergruppen (NST 2007).

Tabelle 27: Überblick – Verwendete Datenquellen für das Güterverkehrsmodell

Quelle	Bezeichnung	Beschreibung	Verwendung
Intraplan	Gleitende Langfrist-Verkehrsprognose 2021–2022, „Prognose 2022“ (BMDV-Prognose 2022)	Entwicklung bestimmter Leitvariablen (2019, 2036, 2041, 2046, 2051); Aufkommen nach Warengruppen (2019)	Fortschreibung des Aufkommens einzelner Gütergruppen; Berechnung des Aufkommens ausländischer Lkw
Destatis	GENESIS-Tabelle 46131-0005	Entwicklung des Aufkommens und der Verkehrsleistung auf der Schiene nach Verkehrsart und Gütergruppen (2011–2022)	Grundlage für die Fortschreibung des Aufkommens und der Verkehrsleistung für die Schiene
Destatis	GENESIS-Tabelle 46321-0007	Entwicklung des Aufkommens und der Verkehrsleistung in der Binnenschifffahrt nach Verkehrsart und Gütergruppen (2011–2021)	Grundlage für die Fortschreibung des Aufkommens und der Verkehrsleistung für die Binnenschifffahrt
Kraftfahrtbundesamt (KBA)	VD4	Aufkommen (2010–2021) und der Verkehrsleistung (2014–2016; 2018–2021) auf der Straße nach Verkehrsart und Gütergruppen	Grundlage für die Fortschreibung des Aufkommens und der Verkehrsleistung für die Straße
Prognos	Prognos Economic Outlook (PEO)	Ex-post-Daten plus Prognose der Entwicklungen (1995–2050) der BWS verschiedener Industriebranchen und weiterer wirtschaftlich relevanter Größen	Fortschreibung des Aufkommens einzelner Gütergruppen
BMDV (2023)	Verkehr in Zahlen 2022/23	Verkehrsaufkommen und -leistung nach Verkehrsträger	Plausibilisierung der Berechnung des Aufkommens und der Verkehrsleistung
Bundesamt für Logistik und Mobilität	Lkw-Mautstatistik	Fahrleistung auf dem mautpflichtigen Streckennetz im Jahr 2019	Berechnung der Lkw-Fahrleistung
KBA	Fahrleistungsstatistik, Verkehr in Kilometern	Inländerfahrleistung Schwerer Nutzfahrzeuge im Jahr 2019	Berechnung der Lkw-Fahrleistung

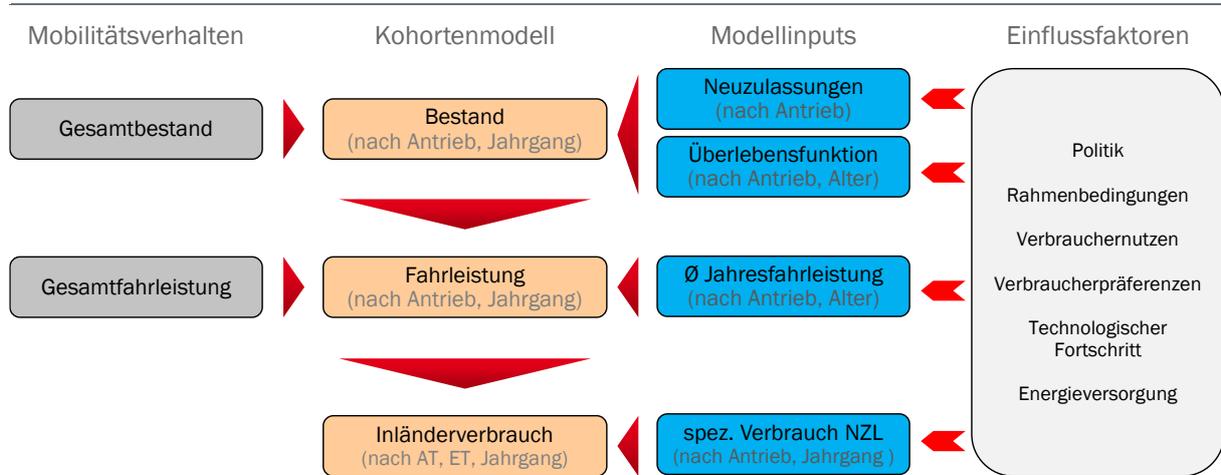
eigene Tabelle

Flottenmodell

Für alle Straßenverkehrsmittel wird der Bestand in Kohorten modelliert, das heißt nach Jahrgang und differenziert nach Antriebstechnologien. Die Antriebsstruktur der Neuzulassungen wird aus den Kaufentscheidungsmodellen abgeleitet. Anhand der KBA-Statistiken wird das Kohortenmodell kalibriert. Die aus dem Bestand berechneten Inländerfahrleistungen werden an den Quell- und Binnenverkehren der Verkehrsnachfragemodellen kalibriert.

Abbildung 29: Flottenmodell

Von den Neuzulassungen zum Inländerverbrauch



AT: Antrieb, ET: Energieträger, NZL: Neuzulassungen, Ø Jahresfahrleistung: durchschnittliche Jahresfahrleistung

eigene Abbildung

Energie- und Emissionenmodell

Im Endenergie- und Emissionsmodell für den Sektor Verkehr werden, basierend auf den Ergebnissen der Verkehrsnachfragemodelle und des Kohortenmodells, der Endenergieverbrauch und die THG-Emissionen des Verkehrssektors differenziert nach Verkehrszweigen, Antriebstechnologien und Energieträger modelliert.

Im Straßenverkehr basiert die Berechnung des Energieverbrauchs auf den Inländerverbräuchen des Kohortenmodells. Darauf aufbauend werden für motorisierte Zweiräder, Omnibusse, Lkw, Leichte Nutzfahrzeuge und Sattelzugmaschinen die Antriebsstruktur der Neuzulassungen, der Bestände und der Fahrleistungen abgebildet. Über die Entwicklung der spezifischen Verbräuche werden die Inländerverbräuche nach Verkehrszweig und Energieträger abgeleitet. Die so berechneten Inländerverbräuche der in Deutschland zugelassenen Fahrzeuge unterscheiden sich von dem in Deutschland abgesetzten Kraftstoff, welcher die Grundlage für die Bilanzierung des Endenergieverbrauchs in den Energiebilanzen bildet. Einerseits tanken in Deutschland zugelassene Fahrzeuge im Ausland, andererseits tanken im Ausland zugelassene Fahrzeuge in Deutschland. Beide Größen können sich deutlich unterscheiden. Der sich daraus ergebende Saldo wird auf die Verkehre der Pkw und des Güterstraßenverkehrs aufgeteilt und basierend auf prognostizierten Inlands- und Inländerfahrleistungen fortgeschrieben.

Die Modellierung der Energieverbräuche und der THG-Emissionen der übrigen Verkehrsträger (Schienenverkehr, Luftverkehr, Küsten-, Binnen- und Seeschifffahrt) baut auf den jeweiligen Verkehrsleistungen des Verkehrsmengenmodells auf. Über die Struktur der eingesetzten Antriebe und die Effizienzentwicklung ergibt sich jeweils der Endenergieverbrauch nach Energieträgern.

Mehr Informationen zu den Modellen und Tools von **Prognos** finden Sie unter: <https://www.prognos.com/de/modelle-tools/modelle>.

Impressum

Szenarien zur Berechnung der Kosten für die Verkehrswende in Deutschland
Studie im Auftrag von Agora Verkehrswende

Herausgeber

Prognos AG
St. Alban-Vorstadt 24
4052 Basel
Telefon: +41 61 3273-310
E-Mail: info@prognos.com
www.prognos.com

Autoren

Alex Auf der Maur
Andreas Brutsche
Marie-Luise Zwicker
Tim Trachsel

Kontakt

Alex Auf der Maur (Projektleitung)
Telefon: +41 61 32 73-477
E-Mail: alex.aufdermaur@prognos.com

Satz und Layout: Prognos AG
Bildnachweis(e): Titelbild: <https://www.agora-verkehrswende.de/themen/infrastruktur/>

Stand: Mai, 2024
Copyright: 2024, Prognos AG

Alle Inhalte dieses Werkes, insbesondere Texte, Abbildungen und Grafiken, sind urheberrechtlich geschützt. Das Urheberrecht liegt, soweit nicht ausdrücklich anders gekennzeichnet, bei der Prognos AG und Agora Verkehrswende. Jede Art der Vervielfältigung, Verbreitung, öffentlichen Zugänglichmachung oder andere Nutzung bedarf der ausdrücklichen, schriftlichen Zustimmung der Prognos AG und Agora Verkehrswende.

Zitate im Sinne von § 51 UrhG sollen mit folgender Quellenangabe versehen sein: Prognos AG (2024): Szenarien zur Berechnung der Kosten für die Verkehrswende in Deutschland