

CLIMATE CHANGE

19/2022

Klimaschutzbeitrag verschiedener CO₂-Preispfade in den BEHG-Sektoren Verkehr, Gebäude und Industrie

von:

Dr. Ralph O. Harthan, Julia Repenning (Projektleitung)

Ruth Blanck, Lukas Emele, Wolf Kristian Görz, Peter Kasten, Lorenz Moosmann
Öko-Institut, Berlin

Jana Deurer, Dr. Jan Steinbach
Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien (IREES GmbH), Karlsruhe

Dr. Tobias Fleiter, Dr. Matthias Rehfeldt
Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI), Karlsruhe

Herausgeber:

Umweltbundesamt

CLIMATE CHANGE 19/2022

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

Forschungskennzahl 3718 41 002 0 - Teilbericht des
Projekts „THG-Projektion: Weiterentwicklung der
Methoden und Umsetzung der EU-Effort Sharing Decision
im Projektionsbericht 2019 („Politiksznarien IX“)“
FB000833

Teilbericht

Klimaschutzbeitrag verschiedener CO₂-Preis- pfade in den BEHG-Sektoren Verkehr, Ge- bäude und Industrie

von

Dr. Ralph O. Harthan, Julia Repenning (Projektleitung)

Ruth Blanck, Lukas Emele, Wolf Kristian Görz, Peter Kasten,
Lorenz Moosmann
Öko-Institut, Berlin

Jana Deurer, Dr. Jan Steinbach
Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien (IREES
GmbH), Karlsruhe

Dr. Tobias Fleiter, Dr. Matthias Rehfeldt
Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung
(Fraunhofer ISI), Karlsruhe

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

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

 [/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

 [/umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

Durchführung der Studie:

Öko-Institut e.V.
Borkumstr. 2
13189 Berlin

IREES GmbH
Durlacher Allee 77
76131 Karlsruhe

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung
Breslauer Str. 48
76139 Karlsruhe

Abschlussdatum:

April 2022

Redaktion:

Fachgebiet V 1.2 Strategien und Szenarien zu Klimaschutz und Energie
Kai Wehnemann

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, Mai 2022

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

Kurzbeschreibung: Klimaschutzbeitrag verschiedener CO₂-Preispfade in den BEHG-Sektoren Verkehr, Gebäude und Industrie

Im Rahmen dieses Projekts wird modelliert, wie sich verschiedene CO₂-Preise im Rahmen des Brennstoffemissionshandelsgesetzes (BEHG) sowie weitere Annahmen auf die Zielerreichung im Jahr 2030 auswirken. Dies wird mit einer iterativen Modellierung der Sektoren Verkehr, Industrie und Gebäude umgesetzt.

Im Rahmen dieses Modellierungsansatzes werden den Sektormodellen CO₂-Preispfade im BEHG exogen vorgegeben. Ausgangspunkt ist das Klimaschutzprogramm 2030 einschließlich aller zuvor eingeführten klima- und energiepolitischen Instrumente. Diese und sonstige Annahmen bleiben im Vergleich zur Bewertung der Treibhausgasminderung des Klimaschutzprogramms 2030 unverändert.

Neben der Wahl des CO₂-Preispfades unterscheiden sich die Sensitivitäten in Bezug auf ihren Planungshorizont bei Neuinvestitionen. So können Akteure bei Ihrer Investitionsentscheidung lediglich die aktuellen CO₂-Preise berücksichtigen. Es wird jedoch auch die Auswirkung von Planungshorizonten von bis zu 20 Jahren untersucht. Darüber hinaus wird in einigen Sensitivitäten ein vorzeitiger Austausch von Investitionsgütern (z.B. Heizungssysteme oder Fahrzeuge), d.h. vor Ablauf der Lebensdauer, angenommen.

In sechs der zehn CO₂-Preissensitivitäten wird die BEHG-Höchstmenge im Jahr 2030 (abgeleitet aus dem zum Zeitpunkt der Modellierung geltenden ESR-Minderungsziel von -38 % bis 2030 ggü. 2005) eingehalten. Jedoch garantiert eine Einhaltung der Höchstmenge im Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) allein nicht gleichzeitig die Einhaltung der zulässigen Emissionen der EU-Klimaschutzverordnung (ESR), da die ESR weitere Emissionen umfasst, wie beispielsweise Emissionen aus Tierhaltung, Abfallwirtschaft oder F-Gasen.

In keiner Sensitivität wird die gesamte zulässige Emissionsmenge gemäß des seit 2021 geltenden Bundes-Klimaschutzgesetzes (KSG) erreicht. In zwei Sensitivitäten erreicht der Gebäudesektor sein neues KSG-Sektorziel für 2030. Die Sektoren Verkehr und Industrie erreichen hingegen in keiner der CO₂-Preissensitivitäten ihr neues Sektorziel im Jahr 2030. Des Weiteren ist zu beachten, dass den Emissionsrückgängen in den Sektoren Industrie, Gebäude und Verkehr ein nicht unerheblicher Anstieg der Emissionen der Energiewirtschaft gegenübersteht, insbesondere durch erhöhte Strom- und Fernwärmenachfragen in öffentlichen Kraftwerken und Heizwerken. Durch diesen Effekt werden je nach Sensitivität bis zu 50 % der in den Sektoren Industrie, Gebäude und Verkehr eingesparten Emissionen in der Energiewirtschaft zusätzlich ausgestoßen.

Abstract: Climate mitigation contribution of different CO₂ price paths in the transport, building and industry sectors covered by the Fuel Emissions Trading Act (BEHG)

Within the scope of this project, it is modelled how different CO₂ prices within the framework of the Fuel Emissions Trading Act (BEHG) as well as further assumptions affect the achievement of the 2030 target. This is implemented by an iterative modelling of the sectors transport, industry, and buildings.

In this modelling approach, CO₂ price paths in the BEHG are exogenously specified for the sector models. The starting point is the Climate Action Programme 2030 including all previously introduced climate and energy policy instruments. These and other assumptions remain unchanged compared to the assessment of the greenhouse gas mitigation effect of the Climate Action Programme 2030.

In addition to the choice of the CO₂ price path, the sensitivities differ in terms of their planning horizon for new investments. In this regard, stakeholders may only take current CO₂ prices into account when making their investment decision. However, the impact of planning horizons of up

to 20 years is also examined. Furthermore, in some sensitivities an early replacement of investment goods (e.g., heating systems or vehicles), i.e., before the end of the lifetime, is assumed.

In six of the ten CO₂ price sensitivities, the BEHG cap in 2030 (derived from the ESR reduction target of -38 % by 2030 compared to 2005 in effect at the time of modelling) is met. However, compliance with the maximum permissible quantity in the Fuel Emissions Trading Act (BEHG) alone does not guarantee meeting permissible emissions under the EU Effort Sharing Regulation (ESR) at the same time, as the ESR includes further emissions, such as emissions from livestock, waste management or F-gases.

In none of the sensitivities is the total permissible emission level according to the Federal Climate Change Act (KSG) in force since 2021 achieved. In two sensitivities, the buildings sector achieves its new KSG sector target for 2030. The transport and industry sectors, in contrast, do not achieve their new sector target in 2030 in any of the CO₂ price sensitivities. Furthermore, it should be noted that the decrease in emissions in the industry, buildings and transport sectors is partly offset by a considerable increase in emissions from the energy sector, in particular due to an increased demand for electricity and district heating in public power plants and heating plants. Depending on the sensitivity, this effect means that up to 50 % of the emissions saved in the industry, buildings and transport sectors are additionally emitted in the energy sector.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	9
Tabellenverzeichnis	10
Abkürzungsverzeichnis.....	11
1 Einleitung.....	12
2 Methodischer Ansatz.....	14
2.1 Modellierungsansatz.....	14
2.2 Berechnung der BEHG-Emissionen	15
2.3 Berechnung der zulässigen BEHG-Höchstmenge.....	16
2.4 CO ₂ -Preispfade und untersuchte Sensitivitäten	17
2.5 Strompreis.....	20
3 Verkehr	22
3.1 Annahmen.....	22
3.1.1 Annahmen im Überblick	22
3.1.2 Wirkung von CO ₂ -Preisen auf die Antriebswahl und Effizienz der Fahrzeuge.....	22
3.1.3 Überlebenskurven.....	23
3.1.4 Wirkung auf die Verkehrsnachfrage	23
3.1.5 Tanktourismus	23
3.1.6 Wirkung auf den Anteil erneuerbarer Kraftstoffe	23
3.1.7 Unsicherheiten in der Modellierung.....	24
3.2 Ergebnisse	24
4 Industrie	30
4.1 Annahmen.....	30
4.1.1 Einfluss der Preissignale auf die Technologieattraktivität.....	30
4.1.2 Einfluss der Austauschraten auf die Technologiediffusion.....	30
4.1.3 Einfluss von Foresight auf Preissignale	31
4.2 Ergebnisse	32
4.2.1 Vorbemerkungen zur Energienutzung.....	32
4.2.2 Sensitivitätseffekte auf Energienutzung	33
5 Gebäude	37
5.1 Annahmen.....	37
5.1.1 Einfluss des CO ₂ -Preises auf den Brennstoffwechsel.....	37
5.1.2 Einfluss der Austauschraten auf die Technologiediffusion.....	37
5.1.3 Übersicht über die Annahmen in den Sensitivitäten	38

5.2	Ergebnisse	38
6	Gesamtergebnisse	44
7	Schlussfolgerungen.....	51
	Quellenverzeichnis	54

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Aufteilung der Treibhausgasemissionen im Jahr 2030 im KSP ^r * nach KSG (2021)-Sektoren und Emissionsregulierungsinstrumenten	17
Abbildung 2:	Untersuchte CO ₂ -Preispfade	18
Abbildung 3:	Darstellung des angenommenen Strompreises für Haushaltskunden im Vergleich zum Szenario KSP ^r (Jan 2020), 2008-2035.....	21
Abbildung 4:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Verkehr im KSP ^r (Jan 2020) und den CO ₂ -Preis-Sensitivitäten.....	25
Abbildung 5:	Treibhausgasminderungsbeitrag der CO ₂ -Preis-Sensitivitäten im Verkehr, 2030 sowie kumuliert 2021-2030	26
Abbildung 6:	Zusammensetzung der Treibhausgasminderungsbeiträge für Preispfad 1, 2030.....	27
Abbildung 7:	Veränderung der Verkehrsnachfrage im Jahr 2030 gegenüber dem KSP ^r (Jan 2020) bei Pkw und Lkw	28
Abbildung 8:	Anteil der elektrischen Fahrleistung bei Pkw und Lkw im Jahr 2030	29
Abbildung 9:	Unterteilung der Energienutzung des Industriesektors nach Betroffenheit durch EU-ETS und BEHG (Daten von 2015)	33
Abbildung 10:	Einfluss der Sensitivitäten auf die Energieträgernutzung im Sektor Industrie, 2030	34
Abbildung 11:	Wirkung der Sensitivitäten auf die Nutzung fossiler Energieträger im Jahr 2030, nach Kategorie	36
Abbildung 12:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Basis-Szenario und den CO ₂ -Preis-Sensitivitäten im Gebäudesektor im Vergleich mit den Zielen des KSG (2021), 2021-2030	39
Abbildung 13:	Treibhausgasminderungsbeitrag der CO ₂ -Preis-Sensitivitäten im Sektor Gebäude, 2030 sowie kumuliert 2021-2030.....	40
Abbildung 14:	Veränderung des EEV nach Energieträgern im Gebäudesektor gegenüber dem Basis-Szenario (KSP ^r (Jan 2020)), kumuliert von 2021 bis 2030	41
Abbildung 15:	Endenergieverbrauch nach Energieträgern im Vergleich der CO ₂ -Preis-Sensitivitäten im Gebäudesektor im Jahr 2030	42
Abbildung 16:	Höhe der Heizungstauschrate nach Gebäudetyp in Sensitivitäten mit und ohne angepasste Austauschrate	43
Abbildung 17:	Veränderung des EEV nach Sektoren gegenüber dem KSP ^r *, 2030.....	44
Abbildung 18:	Veränderung des EEV nach Energieträgern gegenüber dem KSP ^r *, 2030.....	45
Abbildung 19:	Veränderung des Stromverbrauchs gegenüber dem KSP ^r *, 2030.....	46

Abbildung 20:	Veränderung der Treibhausgasemissionen gegenüber dem KSPR*, 2030.....	48
---------------	---	----

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Berechnung der zulässigen BEHG-Höchstmenge	16
Tabelle 2:	Untersuchte CO ₂ -Preispfade	19
Tabelle 3:	Überblick über die Sensitivitäten	20
Tabelle 4:	Angenommener Strompreis für alle Pfade nach Verbrauchern [Eurocent ₂₀₁₆ /kWh]	20
Tabelle 5:	Lebensdauer von Wärmeversorgungssystemen im Gebäudesektor mit und ohne Anpassung	38
Tabelle 6:	Treibhausgasemissionen nach KSG-Sektoren (Mio. t CO ₂ -Äq), 2030	47
Tabelle 7:	Zielerreichung ESR (altes 38 %-Ziel) und BEHG (Mio. t CO ₂ -Äq), 2030	49
Tabelle 8:	Zielerreichung ESR (neues -50 %-Ziel) und BEHG (Mio. t CO ₂ -Äq), 2030	50

Abkürzungsverzeichnis

A	Austauschraten
AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen
BEHG	Brennstoffemissionshandelsgesetz
BHKW	Blockheizkraftwerk
CO₂-Äq	CO ₂ -Äquivalente
EE	Erneuerbare Energien
EEV	Endenergieverbrauch
ESR	Effort Sharing Regulation (EU-Klimaschutzverordnung)
ETS	Emissions Trading Scheme (Emissionshandel)
EU	Europäische Union
F	Foresight (Voraussicht)
G	Gebäude
GHD	Gewerbe, Handel, Dienstleistungen
GV	Güterverkehr
I	Industrie
KSG	Bundes-Klimaschutzgesetz
KSP_r (Jan 2020)	Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (Umsetzungsstand Januar 2020)
KSP_r*	Szenario Klimaschutzprogramm 2030 (Umsetzungsstand Januar 2020) mit geringfügigen Änderungen
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LULUCF	Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (land use, land-use change and forestry)
mA	Mit Änderung der Austauschraten
nEHS	Nationales Emissionshandelssystem
oA	Ohne Änderung der Austauschraten
oF	Ohne Foresight (Voraussicht)
ÖV	Öffentlicher Verkehr
PV	Personenverkehr
S	Sensitivität
SCR	Selektive katalytische Reduktion (selective catalytic reduction)
TCO	Gesamtbetriebskosten (engl.: Total Cost of Ownership)
THG	Treibhausgas
TWh	Terawattstunde
UBA	Umweltbundesamt
V	Verkehr

1 Einleitung

Mit dem Klimaschutzprogramm 2030 hat die Bundesregierung am 9. Oktober 2019 ein umfassendes Programm zur Minderung der Treibhausgasemissionen in Deutschland beschlossen. Kernelemente sind das Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG), das Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) zur Einführung eines nationalen Emissionshandels (nEHS), das Gesetz zur Umsetzung des Klimaschutzprogramms 2030 in Steuerrecht, der ausgehandelte Kompromiss zum Kohleausstieg und ein umfangreiches Investitionsprogramm. In der im Juni 2021 verabschiedeten Novelle des KSG ist eine Treibhausgasminderung von 65 % im Jahr 2030 und von 88 % im Jahr 2040 gegenüber 1990 sowie die Netto-Treibhausgasneutralität im Jahr 2045 vorgesehen.

Im April 2021 haben sich das EU-Parlament und der Europäische Rat auf das Europäische Klimagesetz geeinigt, das eine Minderung der Treibhausgasemissionen aller Mitgliedsstaaten in der Summe netto¹ statt wie bislang vorgesehen um 40 % um mindestens 55 % gegenüber 1990 vorsieht (EC 2020). Dadurch werden sowohl im Bereich des Emissionshandels (ETS) als auch im Bereich der EU-Klimaschutzverordnung (ESR) Ambitionssteigerungen erwartet und mit dem Vorschlag des „Fit for 55“-Paketes (European Commission (EC) 2021) ab Sommer 2021 diskutiert. Der CO₂-Preis im BEHG ist ein ökonomisches Instrument, welches im ESR-Bereich zu Treibhausgasminderungen führt².

Das BEHG umfasst (fast) alle brennstoffbedingten Treibhausgasemissionen, die nicht durch den EU-Emissionshandel abgedeckt sind. In den Jahren 2021-2026 werden diese mit einem festen CO₂-Preis (zwischen 25 €/t und 65 €/t) beaufschlagt. Ab dem Jahr 2027 soll sich der CO₂-Preis im Rahmen des nationalen Emissionshandels am Markt durch Einhaltung einer verbindlichen Emissionsobergrenze (Cap) bilden. Diese Emissionsobergrenze leitet sich wiederum aus dem Emissionsbudget im Rahmen der ESR ab (§ 4 BEHG). Da das BEHG nur die CO₂-Emissionen aus Brennstoffen umfasst, deckt er nur einen Teil der von der ESR regulierten Emissionsmenge ab. In diesem Vorhaben wurde ein Anteil von 71 % angesetzt (Abschnitt 2.2).

Im Rahmen der ebenfalls vom Forschungskonsortium dieses Berichts erstellte Quantifizierung des Klimaschutzprogramms 2030 (Harthan et al. 2020) wurde ab 2027 exogen ein weiter steigender CO₂-Preis angenommen. Im Jahr 2030 erreicht dieser 125 €/t. Die Modellierung zeigt unter anderem, dass unter diesen Rahmenbedingungen das in dieser Studie kalkulierte ESR-Ziel im Jahr 2030 um gut 46 Mio. t CO₂-Äq verfehlt wird. Daraus kann geschlossen werden, dass der angesetzte CO₂-Preis im Zusammenspiel mit dem Instrumentenmix des Klimaschutzprogramms 2030 zu niedrig für die Zielerreichung ist.

Im Rahmen dieses Projekts wurde deshalb untersucht, wie sich verschiedene CO₂-Preispfade im Rahmen des BEHG sowie weitere Annahmen auf die Zielerreichung im Jahr 2030 auswirken. Den Modellen wurde also keine Emissionsgrenzen vorgegeben, sondern stattdessen wurde der Einfluss der Annahmen auf die Erreichung folgender Emissionsziele für das Jahr 2030 untersucht: Einhaltung der nach dem BEHG zulässigen Jahresemissionsmengen, Einhaltung der KSG (2021)-Sektorziele³ und Einhaltung der nach der ESR (neu) zulässigen Emissionen. Dies wurde mit einer Modellierung der Sektoren Verkehr, Industrie und Gebäude umgesetzt.

¹ Dies bedeutet unter Berücksichtigung von Kohlenstoffeinbindungen im Bereich Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF). Der LULUCF-Sektor wurde im vormaligen Minderungsziel von 40 % nicht berücksichtigt.

² Im Rahmen des „Fit for 55“-Programms wird auf EU-Ebene ein separater Emissionshandel ähnlich dem nEHS für die Sektoren Gebäude (Wärme) und Verkehr diskutiert.

³ Zu Beginn des Projektes diente das 543 Mio. t CO₂-Äq-Ziel des alten KSG (2019) als Zielwert, entsprechend etwa einer Minderung von 56,6 % ggü. 1990. Die im novellierten KSG (2021) über alle Sektoren hinweg zulässige Emissionsmenge in Höhe von 438 Mio. t CO₂-Äq entspricht einer Minderung von 65,0 % ggü. 1990. Die Bewertung der Erreichung der KSG-Ziele in diesem Bericht basiert auf den Vorgaben des novellierten KSG (2021).

Kapitel 2 enthält eine Übersicht zum methodischen Ansatz der Modellierung des BEHG. Die in den einzelnen Sektoren getroffenen Annahmen sowie die Diskussion sektoraler Ergebnisse werden in den Kapiteln 3 bis 5 dargestellt. Die Ergebnisse in Bezug auf die Treibhausgasemissionen sowie die Zielerreichung werden in Kapitel 6 diskutiert. Kapitel 7 enthält die Schlussfolgerungen aus dieser Analyse.

2 Methodischer Ansatz

2.1 Modellierungsansatz

Die Modellierung verschiedener CO₂-Preissensitivitäten im BEHG und ihrer Auswirkungen auf sektorale Treibhausgasemissionen basiert auf dem methodischen Ansatz von Politikszenerarien IX und beruht auf der Kopplung verschiedener Sektormodelle. Im Rahmen dieses Modellierungsansatzes wurden die CO₂-Preispfade des BEHG exogen vorgegeben. Alle anderen Annahmen zu den klima- und energiepolitischen Instrumenten bleiben im Vergleich zur Bewertung der Treibhausgasminderung des Klimaschutzprogramms 2030 (Harthan et al. 2020) unverändert.

In der Zusammenschau der Ergebnisse kann die Erreichung der sektoralen Klimaschutzziele bzw. der Einhaltung der Höchstmengen des BEHG überprüft werden. Indem mehrere Modellläufe mit unterschiedlichen CO₂-Preispfaden sowie unterschiedliche Annahmen durchgeführt werden, kann der zu erwartende CO₂-Preisfad für die Einhaltung von Zielen bzw. Höchstmengen abgeschätzt werden. Mit dem gewählten Modellierungsansatz kann die Höchstmenge nicht exakt eingehalten werden, da der CO₂-Preis exogen vorgegeben wird. Es wird also der sich über die Randbedingung der Zielerreichung einstellende CO₂-Preis nicht modellendogen ermittelt.

Die grundlegende Modellierungsmethodik ist in Harthan et al. (2020) detailliert beschrieben, daher werden im Folgenden nur die methodischen Abweichungen dokumentiert.

Die Auswirkung der CO₂-Preis-Sensitivitäten wurden für folgende (Teil-)Sektoren berechnet:

- ▶ Verkehr mit dem Modell TEMPS;
- ▶ Industriewärme und Prozessfeuerungen mit dem Modell FORECAST-Industry;
- ▶ Gebäudewärme in Haushalten und GHD mit dem Modell Invert/ee-lab.

Für den Sektor Energiewirtschaft wurde ein vereinfachter Ansatz zur Berechnung der Rückwirkung der CO₂-Preissensitivitäten auf die Energiewirtschaft gewählt:

- ▶ Veränderte Stromnachfragen⁴ im Jahr 2030 werden mit einem Emissionsfaktor von 280 g CO₂/kWh (bezogen auf den Strom) bewertet und diese Emissionsänderungen bei den öffentlichen Kraftwerken (und damit im KSG-Sektor Energiewirtschaft) verbucht. Dieser Emissionsfaktor entspricht dem in Harthan et al. (2020) für das Szenario KSP_r 2030 (Jan 2020) ermittelten durchschnittlichen Strom-Emissionsfaktor für das Jahr 2030. Er impliziert, dass sich veränderte Stromnachfragen in gleichem Maße auf die fossile wie auf die erneuerbare Stromerzeugung auswirken und ist daher eine Vereinfachung gegenüber einer Modellierung mit einem Strommarktmodell.
- ▶ Veränderte Fernwärmenachfragen werden (unter Berücksichtigung von Wirkungsgradverlusten) durch veränderte Erdgaseinsätze bei den öffentlichen Heizwerken berücksichtigt.
- ▶ Die übrigen Teile der Energiewirtschaft werden mit dem Integrationsmodell ENUSEM berechnet.

Die Treibhausgasemissionen für die übrigen energieverbrauchenden Teilsektoren werden im Rahmen dieser Analyse nicht erneut berechnet. So sind die Industrie- und sonstigen nicht-

⁴ Beispielsweise durch einen Anstieg von Elektromobilität oder der Nutzung von Wärmepumpen durch einen steigenden CO₂-Preis.

öffentliche Kraftwerke größtenteils dem ETS zuzuordnen. Haushaltsgeräte, GHD-Prozesse, Bauwirtschaft und Landwirtschaft haben im Jahr 2030 des KSP^r* insgesamt einen kleinen Anteil von nur 5 % an den Brennstoffemissionen im Sinne des BEHG. Ebenso wurden die Industrieprozesse⁵, die biochemischen Prozesse der Landwirtschaft, LULUCF und die Abfallwirtschaft nicht neu berechnet, da hier keine direkten Effekte durch die CO₂-Bepreisung zu erwarten sind.

Die Berechnung der Preissensitivitäten erfolgt für die Gebäudewärme, die Industriewärme und die Prozessfeuerungen sowie den Verkehr jahresscharf. Die Sensitivitäten wurden jedoch nur für das Jahr 2030 integriert, daher liegen die Emissionsergebnisse nur für 2030 vor.

2.2 Berechnung der BEHG-Emissionen

In Harthan et al. (2020) wurden für die insgesamt 21 energieverbrauchenden Teilsektoren im Integrationsmodell ENUSEM jeweils die Anteile der CO₂-Emissionen bestimmt, die unter den EU-ETS bzw. die ESR fallen.⁶ Diese Methode wurde für die Berechnung der Treibhausgasemissionen für die verschiedenen CO₂-Preissensitivitäten erweitert. In jedem Teilsektor gibt es bis zu 18 verschiedene fossile, biogene und synthetische Brennstoffe. Ausgehend von den EU-ETS/ESR-Splitfaktoren wurden nun für jeden der Brennstoffe in jedem Sektor drei Anteile bestimmt:

- ▶ Energieeinsatz und Emissionen im EU-ETS
- ▶ Energieeinsatz und Emissionen im BEHG
- ▶ Energieeinsatz⁷ und Emissionen in der ESR außerhalb des BEHG

Dabei wurden die brennstoffscharfen EU-ETS- bzw. ESR-Anteile so abgeglichen, dass in einer Kalibrierungs- und Vergleichsrechnung zum Szenario KSP^r 2030 (Jan. 2020) konsistente Ergebnisse erzielt wurden.

In vielen Fällen werden Brennstoffe komplett einem der drei Bereiche zugeschlagen. So werden beispielsweise die Brennstoffeinsätze in Raffinieren sowie sämtliche Sondergase (Gichtgas, Kokereigas, etc.) komplett dem EU-ETS zugeordnet. Ebenso werden beispielsweise die fossilen Brennstoffe der privaten Haushalte und des Straßen- und Schienenverkehrs vollständig dem BEHG zugeordnet. Es wurde weiterhin angenommen, dass die Emissionen aus der Verbrennung biogener Brennstoffe weder unter den EU-ETS noch unter das BEHG fallen.

Da sowohl der EU-ETS als auch das BEHG bei Verbrennungsprozessen ausschließlich CO₂ adressieren, werden sämtliche verbrennungsbedingten Methan- und Lachgasemissionen der ESR außerhalb des BEHG zugeordnet.

Als Ausgangspunkt für die Modellierung wird ein Szenario verwendet, das im Folgenden als KSP^r* bezeichnet wird. Dieses Szenario entspricht dem Szenario „Klimaschutzprogramm 2030 (Stand Januar 2020)“ (Harthan et al. 2020) mit geringfügigen Änderungen aufgrund von Anpassungen in der Energiebilanz und bei der Aufteilung von KWK-Anlagen sowie der Verwendung einer neuen Modellversion im Gebäudesektor. Die Emissionen im Szenario KSP^r* im Jahr 2030 liegen rund 0,3 % unter den Emissionen gemäß KSP^r 2030 (Jan 2020).

⁵ Ausnahmen: Für die Gesamtergebnisse unbedeutende Änderungen der Treibhausgasemissionen ergeben sich bei den Industrieprozessen durch leicht veränderte Energieeinsätze bei der Stahlerzeugung sowie bei den ebenfalls bei den Industrieprozessen verbuchten Emissionen der SCR-Katalysatoren von Dieselfahrzeugen.

⁶ Für die Kraftwerke wurde dies ergänzt um weitere spezielle Annahmen zu kleinen BHKW und die Müllverstromung.

⁷ Das BEHG enthält in Anlage 1 eine abschließende Liste aller vom nEHS erfassten Brennstoffe, die über die entsprechenden Positionen der Kombinierten Nomenklatur definiert sind. Für nicht in der Anlage aufgeführte Brennstoffe müssen auch keine CO₂-Zertifikate abgegeben werden.

Für die Modellierung der Treibhausgasemissionen für die verschiedenen CO₂-Preissensitivitäten wurden nun die aus dem Szenario KSP^r* berechneten, auf den EU-ETS entfallenden, Brennstoffeinsätze (und deren Emissionen) in ENUSEM fixiert. Dadurch werden sämtliche Änderungen der Energieverbräuche in den Sensitivitäten und damit sämtliche Emissionswirkungen dem BEHG bzw. der ESR außerhalb des BEHG zugeordnet.

2.3 Berechnung der zulässigen BEHG-Höchstmenge

Zum Zeitpunkt der Durchführung der Preissensitivitäten lag noch keine offizielle Berechnung der im BEHG festgelegte Höchstmenge an Treibhausgasemissionen vor. Daher wurde diese basierend auf der im vorherigen Abschnitt beschriebenen Methode zur Berechnung der BEHG-Emissionen bestimmt (siehe auch Abschnitt 2.2).

Zunächst wurden dabei für das Jahr 2016, das letzte Jahr, für das im Rahmen des Politikszenarios-IX-Projekts detaillierte sektorale Brennstoffeinsätze und zugehörige Emissionen vorlagen, der Anteil der Brennstoffemissionen bestimmt, die unter das BEHG fallen. Dies ergab 322,3 Mio. t CO₂-Äq. Zusammen mit den für das Jahr 2016 bestimmten ESR-Emissionen in Höhe von 454,1 Mio. t CO₂-Äq ergibt dies einen Anteil von 71,0 %. Dieser Anteil, angewandt auf die zulässigen ESR-Emissionen (bisher -38 % bis 2030 gegenüber 2005)⁸ für das Jahr 2030 in Höhe von 300,6 Mio. t CO₂-Äq, ergibt eine BEHG-Höchstmenge von 213,3 Mio. t CO₂-Äq.⁹ Mit dem „Fit for 55“-Paket der EU-Kommission, ist davon auszugehen, dass Deutschland die ESR-Emissionen bis 2030 um 50 % gegenüber 2005 reduzieren muss. Entsprechend reduzieren sich dann für das Jahr 2030 die zulässigen ESR-Emissionen auf 242,4 Mio. t CO₂-Äq¹⁰ und die BEHG-Höchstmenge auf 172,0 Mio. t CO₂-Äq.

Tabelle 1: Berechnung der zulässigen BEHG-Höchstmenge

Größe	Einheit	Wert
ESR-Emissionen im Jahr 2016	Mio. t CO ₂ -Äq	454,1
Emissionen im Jahr 2016, die unter das BEHG fallen	Mio. t CO ₂ -Äq	322,3
Anteil der BEHG-Emissionen an den ESR-Emissionen im Jahr 2016	%	71,0 %
Zulässige ESR-Emissionen im Jahr 2030 (altes -38%-Ziel)	Mio. t CO ₂ -Äq	300,6
Zulässige ESR-Emissionen im Jahr 2030 (neues -50%-Ziel)	Mio. t CO ₂ -Äq	242,4
Verhältnis der BEHG-Höchstmenge zu den zulässigen ESR-Emissionen (Verwendung des für das Jahr 2016 bestimmten Prozentsatzes)	%	71,0 %
BEHG-Höchstmenge im Jahr 2030 (altes -38%-Ziel)	Mio. t CO ₂ -Äq	213,3
BEHG-Höchstmenge im Jahr 2030 (neues -50%-Ziel)	Mio. t CO ₂ -Äq	172,0

Quelle: Berechnungen Öko-Institut

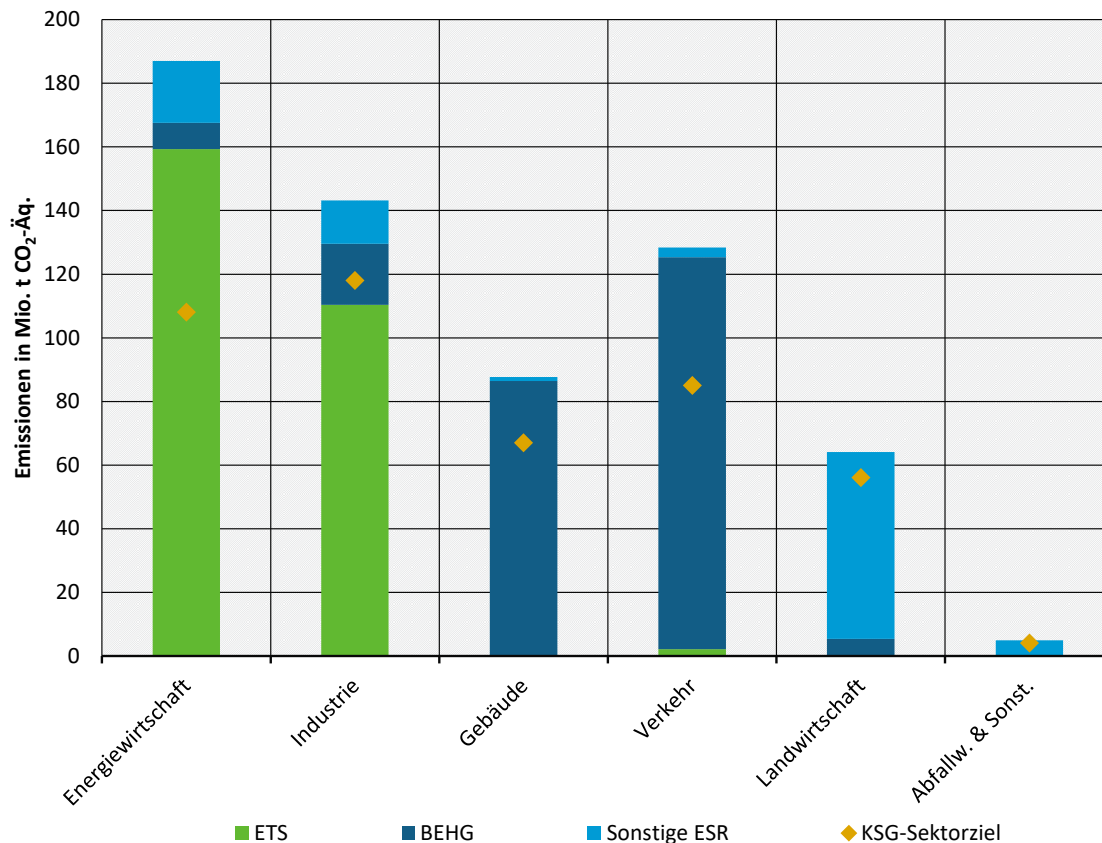
⁸ Die zulässigen ESR-Emissionen (jährliche Emissionszuweisungen gemäß Artikel 4 Absatz 3 der Effort-Sharing-Verordnung) sind in Anhang II des Durchführungsbeschlusses (EU) 2020/2126 festgelegt: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:32020D2126>

⁹ Die Berechnungsvorschrift in § 4 Abs. 1 BEHG impliziert, dass die Emissionen, die nicht vom BEHG erfasst sind, aber dennoch unter die ESR fallen (z.B. biologisch-chemische Emissionen der Landwirtschaft), im gleichen Maße reduziert werden müssen wie die Brennstoffemissionen, um insgesamt die zulässigen ESR-Emissionen einzuhalten.

¹⁰ Der genaue Wert der zulässigen ESR-Emissionen für 2030 steht noch nicht fest. Sofern es für Deutschland zu einer 50%-Minde-rungsverpflichtung im ESR kommt, können sich die zulässigen ESR-Emissionen noch um etwa 1 % vom angegebenen Wert ändern.

Abbildung 1 stellt die für die einzelnen Sektoren abgeleiteten Treibhausgasemissionen im Jahr 2030 im KSP^r* nach KSG (2021)-Sektoren und Emissionsregulierungsinstrumenten dar.

Abbildung 1: Aufteilung der Treibhausgasemissionen im Jahr 2030 im KSP^r* nach KSG (2021)-Sektoren und Emissionsregulierungsinstrumenten



Quelle: Eigene Darstellung Öko-Institut

2.4 CO₂-Preispfade und untersuchte Sensitivitäten

Es wurde die Auswirkung von zehn Sensitivitäten auf die Treibhausgasemissionen in den einzelnen Sektoren untersucht.

Die Sensitivitäten umfassen verschiedene angenommene BEHG-CO₂-Preispfade sowie Annahmen bezüglich der Erwartung zur CO₂-Preisentwicklung (Foresight) bei der Investitionsentscheidung und hinsichtlich der Möglichkeit eines vorzeitigen Austauschs von Investitionsgütern (z.B. Bestands-PkW oder bestehende Heizkessel).

Abbildung 2 und Tabelle 2 zeigen die vier untersuchten CO₂-Preispfade.

Preispfad 1 geht von einer Steigerung des nominalen CO₂-Preises zwischen 2021 und 2026 von 25 €/t auf 65 €/t gemäß der aktuell gültigen Fassung des BEHG aus. Für das Jahr 2030 wird ein CO₂-Preis von 340 €/t angenommen. Im Jahr 2027, zum Zeitpunkt des Starts der freien Handelsphase mit Preisen, die sich am Markt bilden, wird davon ausgegangen, dass aufgrund der Knappheit der Zertifikate der CO₂-Preis bereits bei 75 % des CO₂-Preises im Jahr 2030 liegt. Für die Foresight-Modellierung wird für das Jahr 2050 ein realer CO₂-Preis von 730 €/t in Anlehnung an UBA (2020) angesetzt. Zwischen 2030 und 2050 wird der reale CO₂-Preis interpoliert.

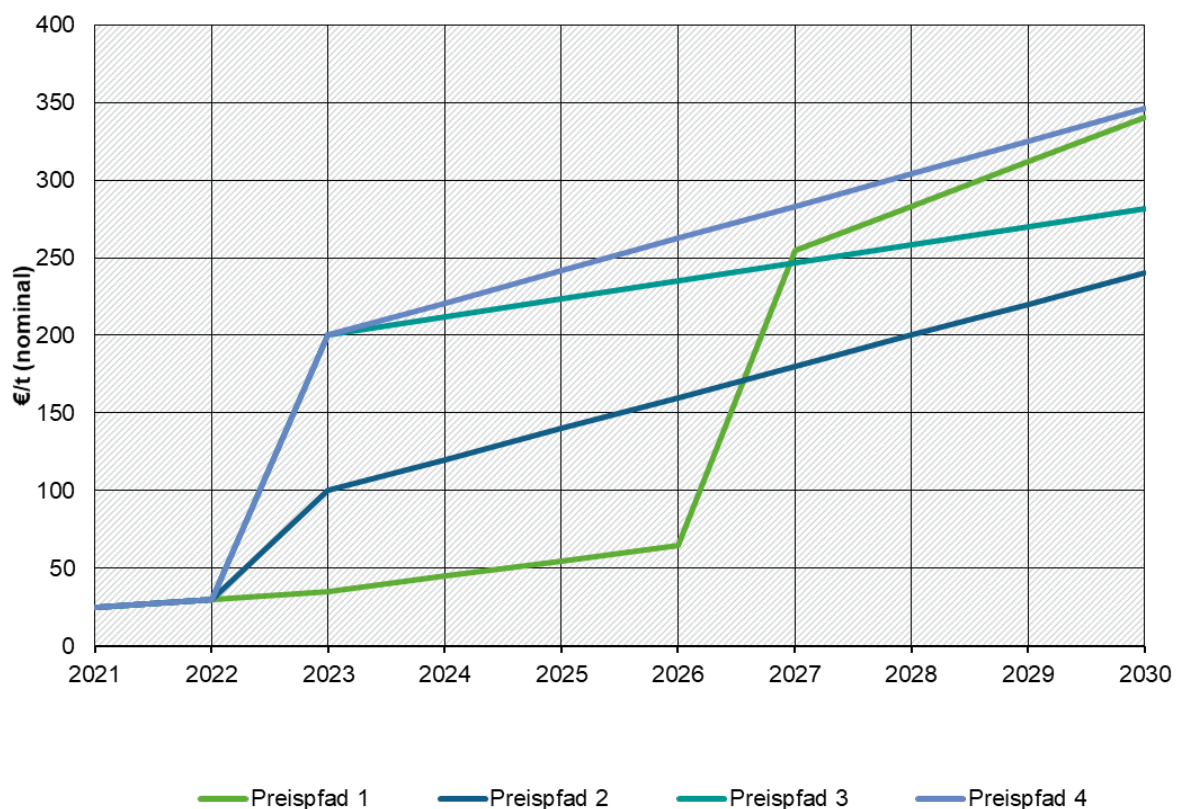
Preispfad 2 geht davon aus, dass der nominale CO₂-Preis bereits im Jahr 2023 auf 100 €/t erhöht wird und dann schrittweise um 20 €/t pro Jahr auf 240 €/t im Jahr 2030 (340 €/t im Jahr 2035) steigt.

Für Preispfad 3 wird angenommen, dass der nominale CO₂-Preis im Jahr 2023 bereits auf 200 €/t angehoben wird und dann linear auf 282 €/t im Jahr 2030 (340 €/t im Jahr 2035) steigt.

Für Preispfad 4 wird ebenfalls von einer starken Anhebung des nominalen CO₂-Preises im Jahr 2023 auf 200 €/t ausgegangen, gefolgt von einer linearen Erhöhung auf 346 €/t im Jahr 2030 (450 €/t im Jahr 2035).

Nominale Preise werden über Anwendung eines Deflators auf reale Preise (Basis 2016) abgezinst, die wiederum Grundlage für die ökonomischen Entscheidungen in den Sektormodellen sind.

Abbildung 2: Untersuchte CO₂-Preispfade



Quelle: Annahmen Öko-Institut, Fraunhofer ISI, IREES, Umweltbundesamt

Tabelle 2: Untersuchte CO₂-Preispfade

Jahr	Preispfad 1	Preispfad 2	Preispfad 3	Preispfad 4
€/t (nominal)				
2021	25	25	25	25
2022	30	30	30	30
2023	35	100	200	200
2024	45	120	212	221
2025	55	140	223	242
2026	65	160	235	263
2027	255	180	247	283
2028	283	200	258	304
2029	312	220	270	325
2030	340	240	282	346

Quelle: Annahmen Öko-Institut, Fraunhofer ISI, IREES, Umweltbundesamt

Neben der Wahl des CO₂-Preispfades unterscheiden sich die Sensitivitäten in Bezug auf ihre CO₂-Preiserwartung (Foresight) bei Neuinvestitionen. So können Akteure bei ihrer Investitionsentscheidung zum einen lediglich die aktuellen CO₂-Preise berücksichtigen. In diesem Fall wird von keiner Voraussicht (oF=ohne Foresight) ausgegangen. Im Verkehrsbereich (V) sind in weiteren Sensitivitäten CO₂-Preiserwartungen (F=Foresight) von bis zu 5 Jahren möglich. Dies bedeutet, dass die Investitionsentscheidung auf Basis der abgezinnten angenommenen CO₂-Preise der auf die Investitionsentscheidung folgenden 5 Jahre basieren. Im Gebäudebereich (G) und Industriesektor (I) werden Zeiträume für CO₂-Preiserwartungen von 5 und 20 Jahren untersucht.

Darüber hinaus wird untersucht, welche Auswirkung es hat, wenn Investitionsgüter vorzeitig, d.h. vor Ablauf der angenommenen Lebensdauer, ausgetauscht werden (sog. Veränderung der Austauschraten (A)). In einigen Sensitivitäten wird angenommen, dass die Güter nach Ablauf der Lebensdauer außer Betrieb genommen werden (oA=ohne Änderung der Austauschraten), in anderen Sensitivitäten ist eine Änderung der Austauschraten möglich (mA=mit Änderungen der Austauschraten).

Eine Beschreibung der Annahmen bezüglich Voraussicht und Austauschraten kann den Annahmen zu den einzelnen Sektoren in den Kapiteln 3 bis 6 entnommen werden.

Eine Sensitivität setzt sich somit aus Angaben zu Preispfad, Foresight und Änderung der Austauschraten zusammen. So wird beispielsweise in Sensitivität S1 (F:20I,20G,5V,oA) der Preispfad 1 angesetzt, wobei von einer Voraussicht (Foresight) von 20 Jahren in der Industrie, 20 Jahren im Gebäudebereich und 5 Jahren im Verkehr ausgegangen wird, ohne veränderte Austauschraten.

Tabelle 3 gibt einen Überblick über die untersuchten Sensitivitäten.

Tabelle 3: Überblick über die Sensitivitäten

Sensitivität	Preisfad	Foresight Industrie	Foresight Gebäude	Foresight Verkehr	Veränderte Austauschraten?
S1 (oF,oA)	1	Ohne	Ohne	Ohne	Nein
S1 (F:20I,20G,5V,oA)	1	20 Jahre	20 Jahre	5 Jahre	Nein
S1 (F:20I,20G,5V,mA)	1	20 Jahre	20 Jahre	5 Jahre	Ja
S1 (F:5,oA)	1	5 Jahre	5 Jahre	5 Jahre	Nein
S1 (F:5,mA)	1	5 Jahre	5 Jahre	5 Jahre	Ja
S2 (oF,oA)	2	Ohne	Ohne	Ohne	Nein
S2 (F:5,oA)	2	5 Jahre	5 Jahre	5 Jahre	Nein
S2 (F:5,mA)	2	5 Jahre	5 Jahre	5 Jahre	Ja
S3 (F:5,oA)	3	5 Jahre	5 Jahre	5 Jahre	Nein
S4 (F:5,oA)	4	5 Jahre	5 Jahre	5 Jahre	Nein

Quelle: Darstellung Öko-Institut, Fraunhofer ISI und IREES

2.5 Strompreis

Tabelle 3 zeigt die Entwicklung der Strompreise nach Verbrauchssektoren, wie sie in die Modellierung der Sensitivitäten eingeflossen sind. Für alle Sensitivitäten wurde die gleiche Zeitreihe zu den Strompreisen genutzt. Die Preise wurden anhand der Entwicklung einzelner Komponenten berechnet und auf die statistischen Preise des Jahres 2017 kalibriert.

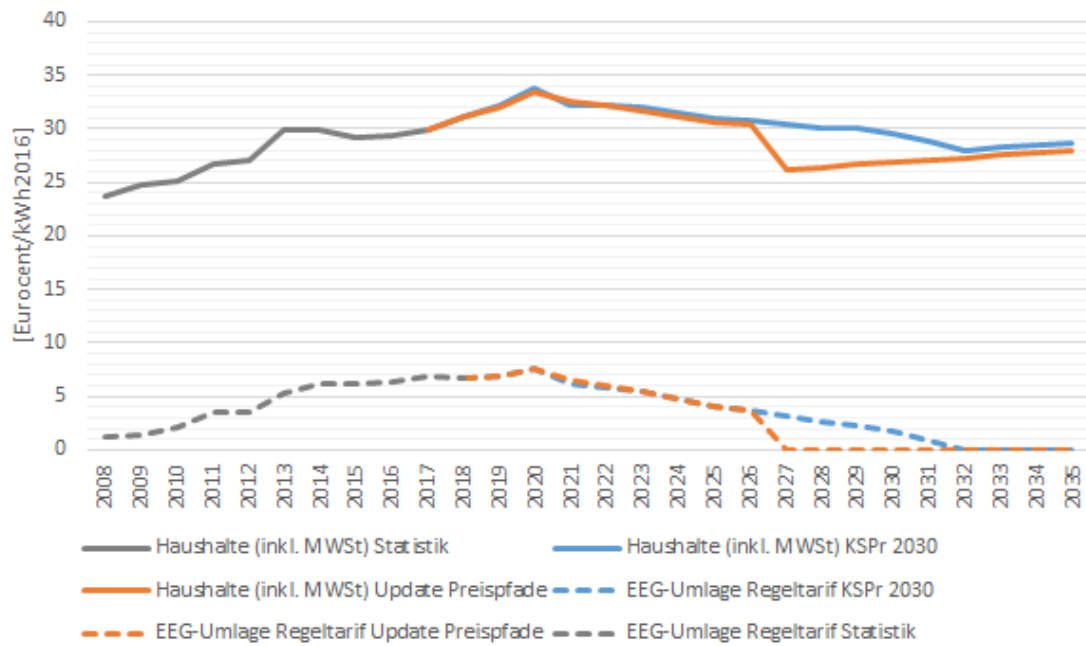
Tabelle 4: Angenommener Strompreis für alle Pfade nach Verbrauchern [Eurocent₂₀₁₆/kWh]

	2017	2020	2025	2030	2035
Haushalte (inkl. MWSt)	29,8	33,5	30,5	26,9	27,9
GHD (ohne MWSt)	21,1	23,1	20,5	17,4	18,3
Industrie (ohne MWSt)	12,1	13,9	13,1	12,0	12,8

Quelle: (Harthan et al. 2020), Annahmen Fraunhofer ISI

Die unterstellten Strompreise beruhen auf den in Harthan et al. (2020) angenommenen Preisen (Szenario KSP_r (Jan 2020)), wobei eine höhere EEG-Entlastung durch die deutlich höheren CO₂-Preispfade des BEHG angenommen wurde. Abbildung 2 zeigt die resultierende Entwicklung des Strompreises für Haushaltskunden im Vergleich zum Szenario KSP_r (Jan 2020). Besonders der vollständige Wegfall der EEG-Umlage ab 2027 wirkt sich deutlich auf die Haushaltsstrompreise aus. Diese sinken von 2026 auf 2027 entsprechend um etwa 4 Cent/kWh. Langfristig gleichen sich die beiden Preispfade wieder an, da auch im Szenario KSP_r (Jan 2020) eine kontinuierliche Reduktion der EEG-Umlage hinterlegt ist. Entsprechende Auswirkungen des Wegfalls der EEG-Umlage auf den mittleren Industriestrompreis sind geringer, da die Industrieunternehmen bereits hohe Entlastungen erhalten.

Abbildung 3: Darstellung des angenommenen Strompreises für Haushaltskunden im Vergleich zum Szenario KSPR (Jan 2020), 2008-2035



Quelle: Berechnungen Fraunhofer ISI

3 Verkehr

3.1 Annahmen

3.1.1 Annahmen im Überblick

Ein CO₂-Preis im Verkehr wirkt sowohl auf die Verkehrsnachfrage (Wahl des Verkehrsmittels, zurückgelegte Distanzen, Auslastung der Fahrzeuge) als auch auf die Investitionsentscheidungen, d.h. auf Antriebsarten und Effizienz der Fahrzeuge.

Alle Sensitivitäten wurden mit dem Modell TEMPS berechnet und basieren auf den Annahmen im Szenario KSP_r (Jan 2020). Allerdings wurde zusätzlich zum KSP_r (Jan 2020) bei den Lkw bei vorteilhafter TCO (Total Cost of Ownership) und passenden Einsatzprofilen (s.u.) eine Elektrifizierung zugelassen. Die Preiselastizität der Fahrleistung beträgt wie im KSP_r (Jan 2020) -0,3 bei Pkw und -0,16 bei Lkw.

In den Sensitivitäten mit „Foresight“ berücksichtigen die Käufer von Pkw und Lkw die zukünftige Entwicklung der Kraftstoff- und CO₂-Preise bei ihrer Antriebswahl. In jedem Jahr der Halte-dauer werden die tatsächlich anfallenden Preise berücksichtigt und nicht für alle Jahre die Preise des Anschaffungsjahres. Zukünftige Zahlungen werden diskontiert. In den Sensitivitäten mit erhöhten Austauschraten verkürzen sich die Nutzungsdauern von ineffizienten Pkw und Lkw bei steigenden CO₂-Preisen in Abhängigkeit der Höhe des Preises.

Im Folgenden werden die zentralen Mechanismen und Annahmen für die Modellierung des Verkehrssektors detaillierter dargestellt.

3.1.2 Wirkung von CO₂-Preisen auf die Antriebswahl und Effizienz der Fahrzeuge

Die Wirkung von CO₂-Preisen auf die Antriebswahl bzw. Effizienz der Fahrzeuge wird über die Neuzulassungsmodellierung in TEMPS abgebildet. Es wird also die Wirkung von veränderten CO₂-Preisen auf die TCO und deren Einfluss auf die Antriebswahl abgebildet. Neben der Kostenbetrachtung fließen aber auch Reichweitenrestriktionen in das Modell ein. Diese bilden ab, dass in manchen Nutzungsfällen Elektrofahrzeuge aufgrund der beschränkten Reichweite nicht eingesetzt werden können.

Im Szenario KSP_r (Jan 2020) (Harthan et al. 2020) wurden keine elektrischen Lkw bei der Modellierung berücksichtigt. In den Sensitivitäts-Berechnungen für verschiedene BEHG-CO₂-Preise wird dagegen aufgrund aktueller Trends davon ausgegangen, dass eine Elektrifizierung für bestimmte Einsatzprofile möglich ist, insbesondere bei kurzen Tagesfahrleistungen.

Der Einsatz von batterieelektrischen Lkw ist dabei durch das jeweilige Einsatzprofil und die dafür erforderliche Reichweite limitiert. In TEMPS sind 2.000 Nutzerprofile hinterlegt, welche auf der Fahrleistungserhebung 2014 (Bäumer et al. 2017) sowie der Erhebung „Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland (2010)“ (Wermuth et al. 2012) basieren. Mit einer zunehmend verdichteten Ladeinfrastruktur sinkt die Limitierung durch die erforderliche Reichweite und es können mehr Fahrzeuge eingesetzt werden. Es wird angenommen, dass bis zum Jahr 2030 ein Drittel der Lkw nicht nur im Depot, sondern auch bei Zwischenstopps laden kann. Somit können zunehmend auch Fahrzeuge mit höheren Jahresfahrleistungen (>80.000 km) elektrisch fahren.

In der „Standardvariante“ (Methodik wie im Szenario KSP_r (Jan 2020)) werden bei der Antriebswahl die Kraftstoffkosten und CO₂-Preise zum Zeitpunkt des Kaufs berücksichtigt, und zwar jeweils über die kalkulatorische Nutzungsdauer der Fahrzeuge. Diese wird bei privaten Pkw mit 3 Jahren, bei gewerblichen Pkw mit 4 Jahren und bei Lkw mit 1-5 Jahren angenommen.

In der Variante mit „Foresight“ wird davon ausgegangen, dass die Käufer die *zukünftigen* Kraftstoffkosten und CO₂-Preise über die Lebensdauer kennen und in ihrer TCO-Berechnung berücksichtigen. Ein Effekt auf den Wiederverkaufswert der Fahrzeuge ist dabei allerdings nicht hinterlegt.

3.1.3 Überlebenskurven

Die Verweildauer neu gekaufter Fahrzeuge im (deutschen) Bestand wird über die in TEMPS hinterlegten Überlebenskurven abgebildet, welche auf TREMOD basieren. Die Überlebenskurven sind abhängig von Größenklasse und Antrieb des Fahrzeugs.

In der „Standardvariante“ (Methodik wie im Szenario KSP_r (Jan 2020)) bleiben die Überlebenskurven ungeachtet anderer Kraftstoffkosten unverändert. In der Variante mit „Austauschraten“ wird hinterlegt, dass bei steigenden Kraftstoffpreisen besonders ineffiziente fossile Fahrzeuge schneller ausgetauscht werden.

Hierfür wurde auf Basis von Jacobsen und van Benthem (2015) ein Zusammenhang zwischen der Erhöhung der Kraftstoffkosten und der Abwrackrate abgeleitet: Eine Erhöhung der Kilometerkosten um 0,10 €/km führt dazu, dass sich die „scrap rate“ (d.h. die Rate der abgewrackten Pkw) für alle Pkw älter als 10 Jahre um 3,7 % erhöht. Für Lkw konnten keine Studien zum Zusammenhang zwischen Kraftstoffpreisen und Haltedauern ermittelt werden. Aufgrund der allgemein kürzeren Haltedauern von Lkw wurde im Modell jedoch angenommen, dass Lkw bereits ab einem Alter von 4 Jahren ebenfalls mit 3,7 % je 10 ct/km reagieren.

3.1.4 Wirkung auf die Verkehrsnachfrage

Die Elastizität der Pkw-Fahrleistung auf die Kilometerkosten wird (wie bei der Bewertung des Klimaschutzprogramms 2030) mit -0,3 angenommen und die Transportkostenelastizität der Lkw-Fahrleistung mit -0,6 (d.h. die Erhöhung der Transportkosten um 1 % führt zu einer Mindereleistung der LKW-Fahrleistung um 0,6 %). Dies entspricht bei schweren Lkw bei einem Kraftstoffkostenanteil an den Transportkosten von 27 % einer Kraftstoffpreiselastizität der Lkw-Fahrleistung von etwa -0,16. Bei der Wirkung des CO₂-Preises auf die Verkehrsnachfrage wird die Wechselwirkung mit der Effizienzentwicklung berücksichtigt, d.h. je effizienter Pkw sind, desto geringer ist die Wirkung auf deren Fahrleistung.

3.1.5 Tanktourismus

Bei den Modellierungen werden mögliche Effekte des Tanktourismus nicht berücksichtigt. Insbesondere bei hohen CO₂-Preisen und großen Divergenzen zu EU-Nachbarländern könnte es dazu kommen, dass mehr im Ausland getankt wird. Dadurch würden sich die Treibhausgasemissionen in Deutschland (berechnet auf Basis der nationalen Energiebilanz) tendenziell stärker reduzieren und stattdessen in anderen Ländern anfallen.

3.1.6 Wirkung auf den Anteil erneuerbarer Kraftstoffe

In der Modellierung wird kein Effekt des CO₂-Preises auf den Anteil erneuerbarer Kraftstoffe angenommen. Derzeit werden alternative Kraftstoffe (Biokraftstoffe und strombasierte Kraftstoffe) bei der Ermittlung der sektoralen Treibhausgasemissionen mit Null bewertet. Vorkettenemissionen sind – sofern sie in Deutschland anfallen – den entsprechenden Sektoren zugeordnet, also insbesondere der Landwirtschaft bzw. Stromerzeugung. Auch im Rahmen des BEHG muss nach derzeitiger Rechtslage für erneuerbare Kraftstoffe kein CO₂-Preis gezahlt werden.

Wenn erneuerbare Kraftstoffe im Rahmen des BEHG generell mit Nullemissionen bewertet werden und der CO₂-Preis höher als die CO₂-Vermeidungskosten¹¹ von CO₂-armen Kraftstoffen liegt, kann sich ein Anreiz zum Einsatz dieser Kraftstoffe ergeben. Die Optionen Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse und aus gebrauchten Speiseölen sind mit Vermeidungskosten von rund 55 bis 70 €/t CO₂ am günstigsten, wenn sie mit Nullemissionen angerechnet werden (DBFZ 2018). Das birgt damit die Gefahr, dass nicht nachhaltige Mengen dieser Biokraftstoffe bereits bei niedrigen CO₂-Preisen in den Markt kommen. Die CO₂-Vermeidungskosten von fortschrittlichen Biokraftstoffen sind mit 150 bis 350 €/t CO₂ deutlich höher (DBFZ 2018; Hobohm et al. 2018).¹² Je nach Kostenentwicklung bei der Stromerzeugung und den Investitionskosten der Produktionsanlagen ergeben sich mit 250 bis 600 €/t CO₂ im Jahr 2030 die höchsten CO₂-Vermeidungskosten für die flüssigen strombasierten Kraftstoffe (Agora Verkehrswende et al. 2018).

Demnach könnten bei steigenden CO₂-Preisen verstärkt Biokraftstoffe und vor allem wenig nachhaltige Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse im Verkehr eingesetzt werden. Andererseits gibt es den klaren politischen Willen, den Anteil der Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse aufgrund von deren umstrittener Nachhaltigkeit und Klimaschutzbeitrag zu begrenzen. Sie sind daher in der THG-Quote nur bis zu einem energetischen Anteil von 4,4 % im Verkehr anrechenbar.

Für die Berechnungen wird davon ausgegangen, dass aus diesem Grund eine Anpassung des BEHG erfolgt, so dass erneuerbare Kraftstoffe nur bis zur Höhe der THG-Minderungsquote zur Erfüllung der RED II mit Nullemissionen bewertet werden. Daher ergibt sich kein zusätzlicher Effekt des CO₂-Preises auf den Anteil alternativer Kraftstoffe.

3.1.7 Unsicherheiten in der Modellierung

Relevante Unsicherheiten in der Modellierung ergeben sich zum einen hinsichtlich der Reaktion der Verkehrsnachfrage: Nahezu alle empirisch ermittelten Preiselastizitäten der Verkehrsnachfrage wurden auf Grundlage von Preisschwankungen abgeleitet, welche viel niedriger waren als die Preisänderungen, die sich durch einen ansteigenden (hohen) CO₂-Preis erwarten lassen. Auch hängen die Nutzerreaktionen auf Preise wesentlich von der Verfügbarkeit und Attraktivität von Alternativen ab – d.h. beispielsweise von einem attraktiven ÖV-Angebot oder geeigneten E-Pkw-Modellen. Zum anderen beruht die Pkw-Kaufentscheidung nicht allein auf einem reinen Kostenkalkül, sondern wird auch entscheidend durch subjektive Faktoren wie der Akzeptanz verschiedener Antriebstechnologien bestimmt. Um den möglichen Einfluss einer planbaren Kraftstoffpreiserhöhung abzubilden, wurden die Sensitivitäten zu Foresight und erhöhten Austauschraten berechnet.

3.2 Ergebnisse

Bis zum Jahr 2030 sinken die Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors in den Sensitivitäten auf 106 bis 115 Mio. t CO₂-Äq (Abbildung 4). Das ist ein deutlicher Rückgang gegenüber dem Szenario KSP_r (Jan 2020), in welchem bei einem CO₂-Preis von 125 €/t im Jahr 2030 die Treibhausgasemissionen noch bei 128 Mio. t CO₂-Äq liegen. Gegenüber dem KSG (2021)-Ziel von 85 Mio. t CO₂-Äq verbleibt in allen Sensitivitäten dennoch eine Lücke von mehr als 20 Mio. t CO₂-Äq.

Der Treibhausgasemissionsminderungsbeitrag hängt vom Verlauf des Preispfads (schnellerer oder langsamerer Anstieg) sowie von den Annahmen zur Berücksichtigung steigender CO₂-Preise beim Fahrzeugkauf (Foresight) und den Annahmen zum schnelleren Austausch von Altfahrzeugen ab.

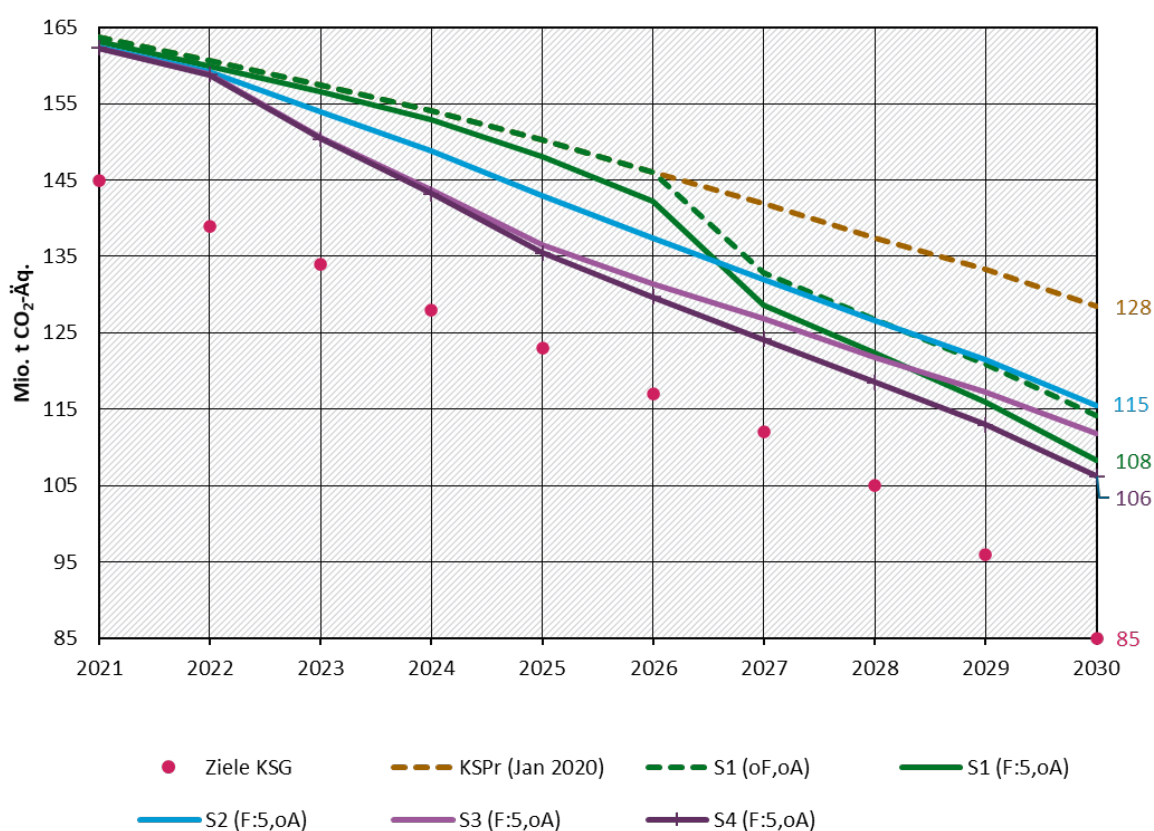
¹¹ Dabei sind die CO₂-Vermeidungskosten zu berechnen als die Mehrkosten von CO₂-armen Kraftstoffen gegenüber fossilen Kraftstoffen, geteilt durch die dadurch erzielte direkte CO₂-Minderung (also dem CO₂-Gehalt des fossilen Kraftstoffs).

¹² Dieser Wert ist abgeleitet aus Gestehungskosten für Bioethanol aus Lignocellulose von 25-40 €/GJ und einem Kraftstoffpreis von 5 ct/kWh.

Abbildung 4 stellt den Verlauf der vier Preispfade jeweils mit 5 Jahren Foresight und ohne schnellere Austauschraten gegenüber (durchgezogene Linien). In den Jahren mit den sprunghaft ansteigenden CO₂-Preisen (bei Pfad 1 im Jahr 2027, bei Pfad 3 und Pfad 4 im Jahr 2023) reagiert jeweils die Verkehrsnachfrage spürbar und führt zu einem deutlichen Absinken der Treibhausgasemissionen.

Durch die Foresight-Annahme reagieren die Fahrzeugkäufer*innen frühzeitiger. Das zeigt der Vergleich des Preispfads 1 mit (S1 (F:5,oA)) und ohne (S1 (oF,oA)) Foresight: Ohne Foresight verlaufen die CO₂-Preise und die Treibhausgasemissionen bis 2026 identisch zum KSPR (Jan 2020). Mit Foresight liegen durch die veränderten Kaufentscheidungen die Treibhausgasemissionen schon vor 2026 unterhalb der Trajektorie des KSPR (Jan 2020), obwohl bis dahin die CO₂-Preise identisch sind.

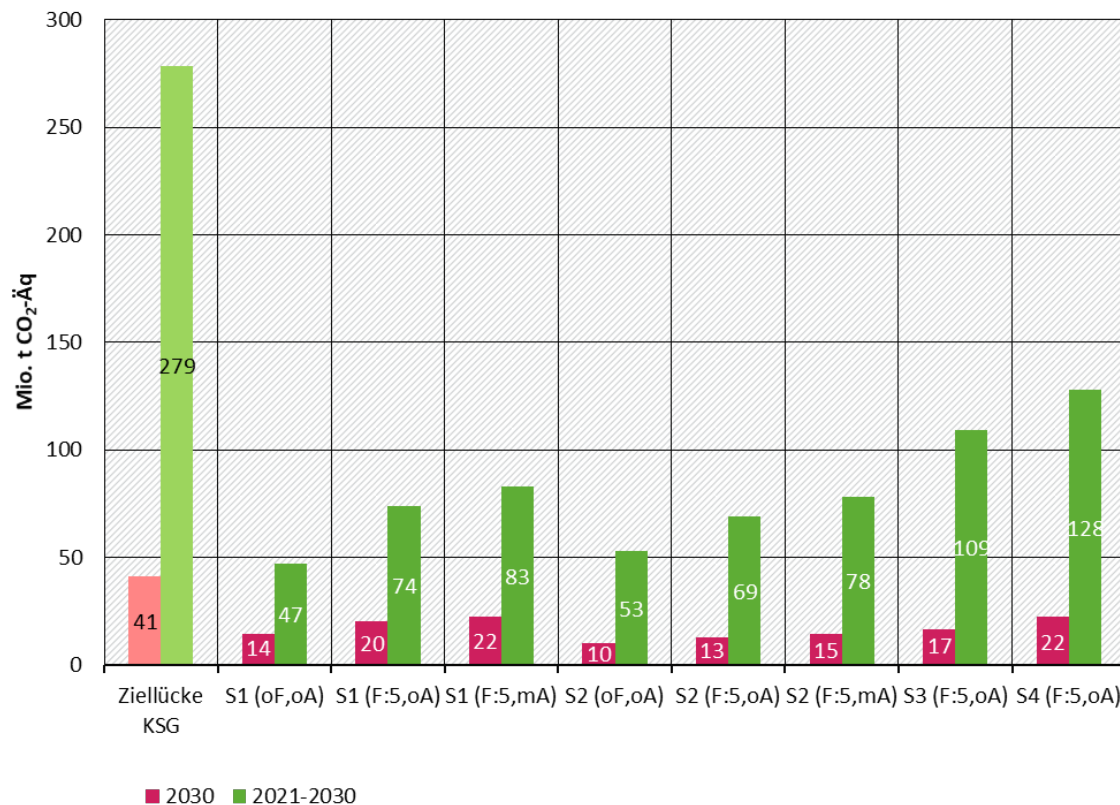
Abbildung 4: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Verkehr im KSPR (Jan 2020) und den CO₂-Preis-Sensitivitäten



Quelle: Berechnung Öko-Institut

Abbildung 5 zeigt den Treibhausgaseminderungsbeitrag der Sensitivitäten im Verkehrssektor im Überblick, einmal für das Jahr 2030 und einmal kumuliert für die Periode 2021-2030. Der zusätzliche Minderungsbeitrag ist gegenüber dem Szenario KSPR (Jan 2020) berechnet, in welchem der CO₂-Preis im Jahr 2030 bei 125 €/t liegt. Zum Vergleich ist links die im KSPR verbleibende Lücke gegenüber dem KSG (2021)-Zielpfad einmal für das Jahr 2030 und kumuliert dargestellt. In den betrachteten CO₂-Preis-Sensitivitäten können gegenüber dem Szenario KSPR (Jan 2020) zusätzlich 10-22 Mio. t CO₂ im Jahr 2030 eingespart werden. Bei Preispfad 3 und Preispfad 4 sind die kumulierten Treibhausgasminderungen durch den frühzeitig starken Anstieg der CO₂-Preise besonders hoch und liegen deutlich über 100 Mio. t CO₂-Äq.

Abbildung 5: Treibhausgasminderungsbeitrag der CO₂-Preis-Sensitivitäten im Verkehr, 2030 sowie kumuliert 2021-2030

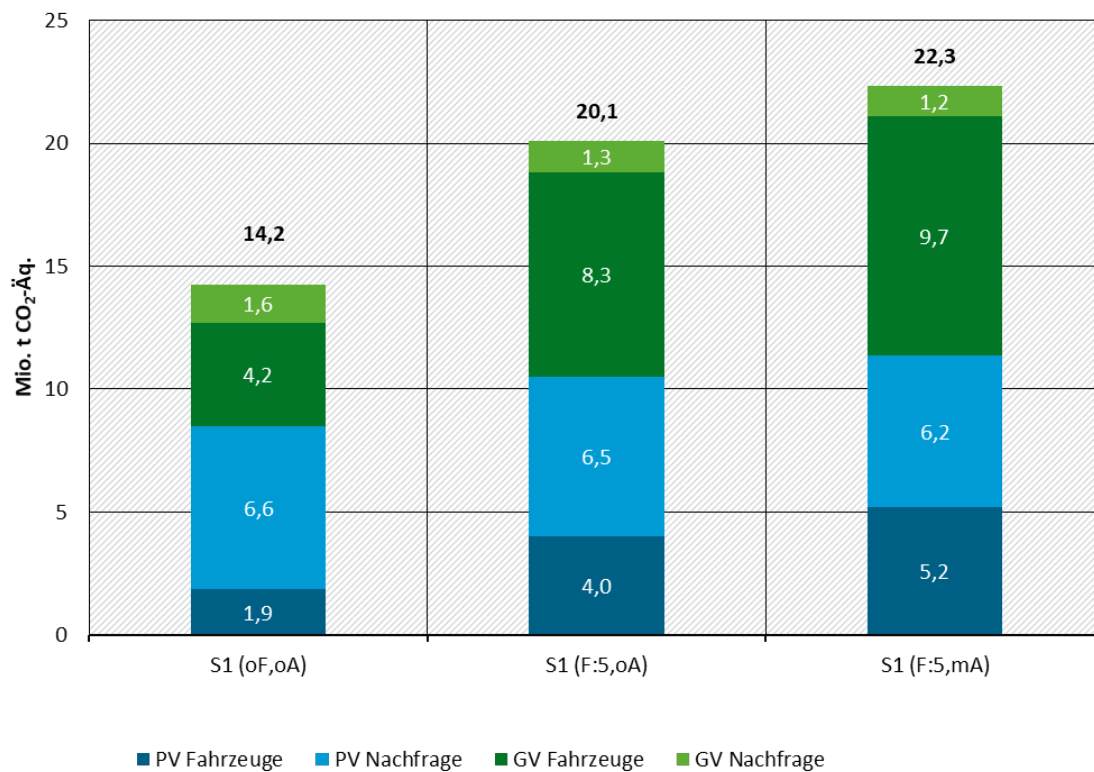


Quelle: Berechnung Öko-Institut

Abbildung 6 zeigt die Zusammensetzung der Treibhausgasminderungsbeiträge im Jahr 2030 beispielhaft für Preispfad 1. Zu der Treibhausgasminderung in den Sensitivitäten tragen sowohl der Personenverkehr (PV) als auch der Güterverkehr (GV) bei. Im Personenverkehr liegt der Treibhausgasminderungsbeitrag durch die Verlagerung und Vermeidung von Pkw-Wegen höher als die Minderung durch die Veränderung des Fahrzeugbestands; im Güterverkehr ist das Verhältnis gerade andersherum. Dabei ist jedoch auch anzumerken, dass im Szenario KSP_r (Jan 2020), welches als Vergleichsbasis dient, bei den Lkw noch keine Elektrifizierung hinterlegt war und daher die Zusatzwirkung hier besonders deutlich ausfällt.

Mit der Annahme zu 5 Jahren Foresight bei der Fahrzeugwahl ergibt sich im Preispfad 1 bei den Pkw eine zusätzliche Treibhausgasminderung von 2,1 Mio. t CO₂-Äq gegenüber der Sensitivität ohne Foresight; der schnellere Fahrzeugtausch führt zu weiteren 1,2 Mio. t CO₂-Äq Minderung. Bei den Lkw ist der Effekt der Foresight-Annahme noch deutlich stärker spürbar. Die Haltedauern der Lkw sind niedriger als bei den Pkw, weshalb sich Veränderungen in der Fahrzeugwahl schneller im Fahrzeugbestand niederschlagen.

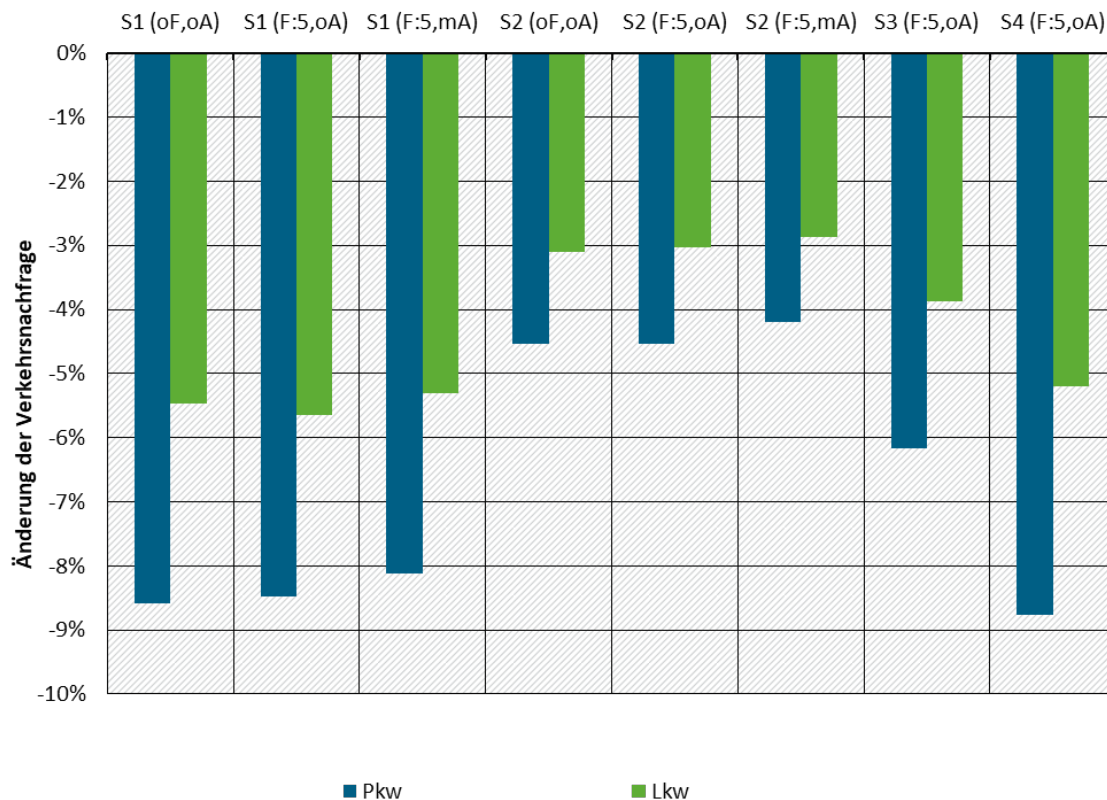
Abbildung 6: Zusammensetzung der Treibhausgasminderungsbeiträge für Preispfad 1, 2030



Quelle: Berechnung Öko-Institut

Die Pkw-Fahrleistung geht in den Sensitivitäten zwischen 4 % und 9 % zurück (Abbildung 7). Dabei wird im Vergleich der Sensitivitäten auch ein (geringer) Rebound-Effekt sichtbar, d.h. bei stärkerer Effizienzsteigerung im Fahrzeugbestand fällt der Rückgang der Verkehrsnachfrage etwas geringer aus. Entsprechend ist der Treibhausgasminderungsbeitrag durch Elektrifizierung in den Sensitivitäten mit Foresight und mit Austauschraten höher, dafür der Treibhausgasminderungsbeitrag durch die Änderung der Fahrleistung jedoch etwas niedriger. Bei den Lkw reagiert die Verkehrsnachfrage weniger elastisch auf Preisänderungen und damit ist auch der Rückgang der Verkehrsnachfrage niedriger, er liegt zwischen 3 % und 5 %.

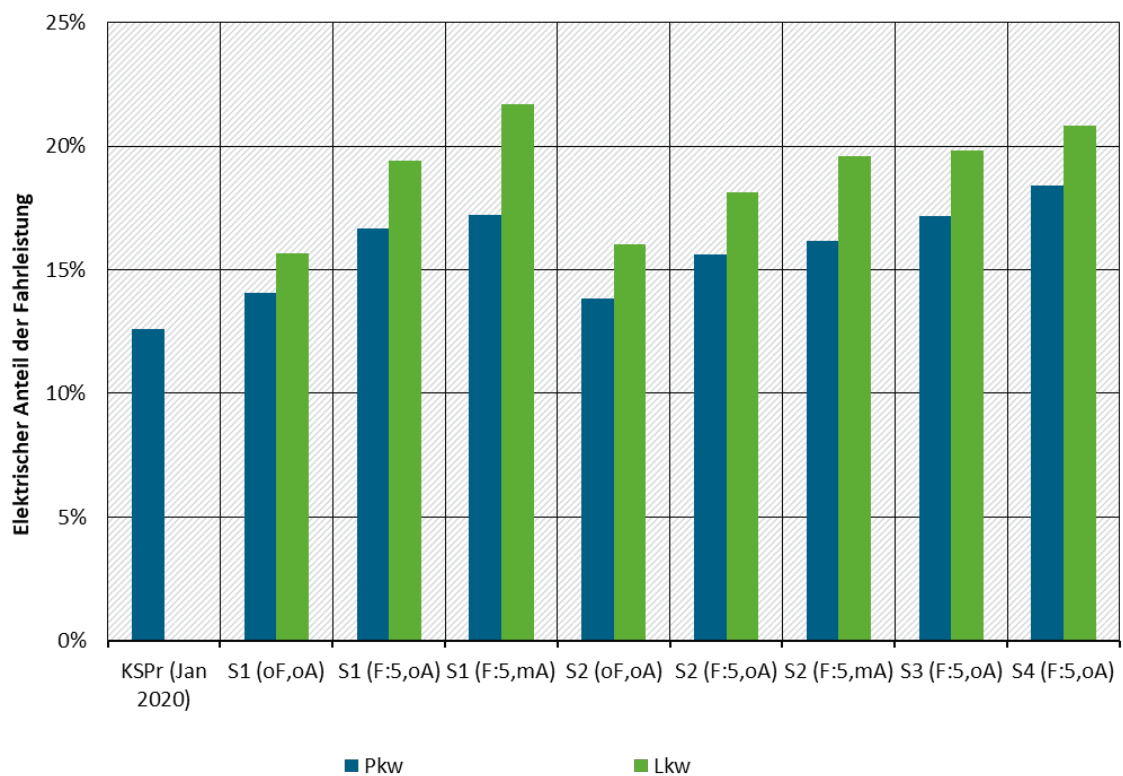
Abbildung 7: Veränderung der Verkehrsnachfrage im Jahr 2030 gegenüber dem KSPR (Jan 2020) bei Pkw und Lkw



Quelle: Berechnung Öko-Institut

Die elektrische Fahrleistung steigt bis zum Jahr 2030 bei Pkw von unter 1 % auf 14-18 % und bei Lkw auf 16-22 % (Abbildung 8). Für die elektrische Fahrleistung ist die Neuzulassungsstruktur für die gesamte Periode 2021-2030 und damit die Preistrajektorie relevant, während die Verkehrsnachfrage stärker vom Preis des jeweiligen Jahres beeinflusst wird. Gegenüber dem Szenario KSPR (Jan 2020) wurde ein Ausbau der Ladeinfrastruktur für Lkw angenommen, sodass es in allen Sensitivitäten zu einer deutlichen zusätzlichen Elektrifizierung im Straßengüterverkehr kommt. Der Anteil der elektrischen Fahrleistung ist in Preispfad 1 und Preispfad 2 auf recht ähnlichem Niveau: während bis 2026 Preispfad 2 höher liegt, springt im Jahr 2027 Preispfad 1 deutlich über das Niveau von Preispfad 2. Das zusätzliche Potenzial von Pfad 3 und Pfad 4 wird auch durch Annahmen zur Ladeinfrastrukturverfügbarkeit limitiert.

Abbildung 8: Anteil der elektrischen Fahrleistung bei Pkw und Lkw im Jahr 2030



Quelle: Berechnung Öko-Institut

4 Industrie

4.1 Annahmen

Im Industriesektor wirkt das BEHG auf eine im Vergleich zum EU-ETS kleine Emissionsmenge. Diese lässt sich stark technologiespezifisch der Prozesswärmeerzeugung in kleinen (für den Industriekontext), verteilten Anlagen zuordnen – große Emittenten (z.B. Stahlerzeugung und Verarbeitung, Zement, Papier, Grundstoffchemie) sind bereits im EU-ETS erfasst.

Bei den vom BEHG betroffenen Technologien handelt es sich überwiegend um Dampf- und Warmwasser-Erzeugungsanlagen sowie zu einem geringeren Teil um Industrieöfen. Im verwendeten Modell FORECAST (Fraunhofer ISI et al. 2021; Fleiter et al. 2018) teilt sich die Modellierung der untersuchten Sensitivitäten in drei verschiedene Effekte auf: Technologieattraktivität, Technologieaustausch und Preisvoraussicht („Foresight“).

Für modellseitig gewählte Ausprägungen der Effekt-Implementierung ist zu bemerken, dass auch andere Setzungen möglich sind. Dies betrifft vor allem die Erhöhung der Austauschrate und der attraktivitätsgesteuerten Technologieentscheidung (s.u.). Die genutzten Ausprägungen basieren auf Expertenschätzungen der bearbeitenden Personen.

4.1.1 Einfluss der Preissignale auf die Technologieattraktivität

Für die Bestimmung der Attraktivität einer Technologie zur Erzeugung von Prozesswärme wird davon ausgegangen, dass das bereitgestellte Produkt (Prozesswärme) von allen Technologien in gleicher Qualität geliefert wird. Technologien, die dies nicht sicherstellen können (z.B. Niedertemperaturtechnologien wie Wärmepumpen außerhalb ihrer definierten Temperaturfenster) werden in der Konkurrenz der Technologien ausgeschlossen. Somit verbleibt der Aufwand – repräsentiert durch Wärmegestehungskosten – als maßgebliches Kriterium¹³ der Technologiewahl. Dabei werden annuierte Investitionen, Betriebs- und Wartungskosten, Energiekosten und CO₂-Kosten der verfügbaren Technologien summiert. Anhand der so entstehenden Gesamtkosten wird die Attraktivität der Technologien abgeleitet, wobei günstigere Technologien attraktiver sind.

Die Sensitivitätenrechnung der BEHG-Preise verschiebt durch die veränderte CO₂-Kostenkomponente diese Wahrnehmung der Attraktivität zugunsten von CO₂-armen bzw. CO₂-neutralen Technologien. Dies sind maßgeblich biomassebasierte Kessel und KWK-Anlagen sowie Wärmepumpen und Elektrodenkessel. In der Konkurrenz innerhalb fossiler Anlagen profitieren erdgas- und heizölbasierte Anlagen gegenüber solchen, die mit Kohlen oder emissionsintensiveren Gasen betrieben werden¹⁴.

4.1.2 Einfluss der Austauschraten auf die Technologiediffusion

Auf die Berechnung der Technologieattraktivität folgt der zweite Schritt der Technologiewahl, der tatsächliche Austausch von Anlagen. In FORECAST wird anhand der Lebensdauer bestehender Anlagen der in jedem Modellierungsjahr stattfindende Austausch von Anlagen (nach der von ihnen gelieferten Energiemenge) modelliert. Die am Ende ihrer Lebensdauer angelangten Anlagen werden durch neue Anlagen ersetzt, deren Technologie sich aus der im ersten Schritt ermittelten Attraktivität bestimmt.

¹³ Hinzu kommen empirisch ermittelte verhaltensbedingte Modifikatoren (siehe Methodikbeschreibungen, u.A. Rehfeldt et al. 2019). Diese werden in dieser Untersuchung aber konstant gehalten.

¹⁴ Dieser Effekt ist aber üblicherweise gering, da Erdgas sowieso der dominante Energieträger ist. Der Effekt wird darüber hinaus oft durch den Wechsel zu den CO₂-ärmeren Technologien überlagert.

Für die Wirkung von CO₂-Bepreisung bedeutet dieser Ansatz, dass auch starke Preissignale keine Änderungen der Emissionen hervorrufen könnten, wenn keine Anlagen ausgetauscht werden. Und im Umkehrschluss bedeutet es, dass ein starker Austausch von Anlagen notwendig ist, um die durch Preissignale veränderten Technologiebewertungen umzusetzen.

In der Realität wäre zu erwarten, dass starke Preissignale nicht ausschließlich bei einer Ersatzinvestition für veränderte Technologiebewertungen sorgen, sondern darüber hinaus auch die Bewertung existierender Anlagen beeinflussen. So könnten Betreiber*innen von erdgasbasierten Anlagen einen vorzeitigen Ersatz ihrer Anlagen in Erwägung ziehen, wenn etwa der Restwert der Investition der bestehenden Anlage geringer ist als die zu erwartenden Mehrkosten des Betriebes über die verbleibende Laufzeit.

Aufgrund mangelnder empirischer Daten ist dieser Zusammenhang (also eine Veränderung der tatsächlichen/ökonomischen Lebensdauer durch Preissignale) nicht endogen abgebildet. Stattdessen wird der Effekt losgelöst von den anderen Einflüssen dargestellt (siehe Architektur der Sensitivitäten in Tabelle 3). Eine erhöhte Austauschrate bedeutet dabei, dass Anlagen – exogen vorgegeben – bereits nach 75 % ihrer sonst üblichen Lebensdauer ausgetauscht werden. Dies sorgt für einen schnelleren Austausch und einen stark erhöhten Effekt der Preissignale auf Energienutzung und Treibhausgasemissionen (da die veränderte Attraktivität tatsächlich umgesetzt wird).

Ein weiterer Aspekt wird als Reaktion auf Preissignale in Bezug auf die Entscheidungsprozesse modelliert. Für viele vom BEHG betroffene Anlagenbetreiber*innen sind Investitionen in die Prozesswärmeerzeugung nicht notwendig Kerngeschäft und Investitionsentscheidungen werden mit einem geringen Maß an Informationen getroffen. Dies drückt sich im Modell dadurch aus, dass 50 % der Investitionsentscheidungen nicht anhand der berechneten Technologieattraktivität, sondern anhand der bereits vorhandenen Anlage getroffen werden. Es wird die gleiche Technologie wiedergewählt. Im Zuge der Anpassung der Austauschraten (die eine Verhaltensänderung anzeigen), wird auch dieses Verhalten dahingehend geändert, dass nun 75 % der Anlagenbetreiber*innen anhand der Technologieattraktivität auswählen. Auch dies erhöht die Wirkung von Preissignalen und ist als Annahme zu verstehen, da keine empirischen Daten zur Stärke des Effektes vorliegen.

4.1.3 Einfluss von Foresight auf Preissignale

In der Grundform der Investitionsentscheidung berücksichtigen Investierende ausschließlich die im Jahr der Investitionsentscheidung dargebotenen Preisdaten (CO₂-Preise, Energieträgerpreise, Investitionskosten). Sie erwarten hierfür also keine Preisentwicklung. Mit "Foresight", gekennzeichnete Sensitivitäten erweitern das Investitionskalkül um eine Kenntnis der zukünftigen Preise. Dies führt – gerade bei stark steigenden CO₂-Preisen – zu einer höheren Gewichtung der CO₂-Komponente. Die Investierenden berücksichtigen damit den CO₂-Preis in 5 oder 20 Jahren (als konstanten Preis für den gesamten Planungshorizont) und sagen ihn korrekt voraus (anhand der hinterlegten Preispfade, siehe Abbildung 2). Dies verstärkt die Wirkung der Preissignale auf die Technologieattraktivität. So wird bei 20 Jahren Foresight bereits 2020 der hinterlegte CO₂-Preis des Jahres 2040 berücksichtigt (zwischen 300 und 500 €/t). Ein "Foresight" von 20 Jahren ist als Extremfall einzuschätzen, der nicht rein durch Erwartung – sondern nur durch politische Festlegung und transparente Kommunikation – plausibel scheint. Die mit dieser Eigenschaft ausgestatteten Sensitivitäten nehmen also an, dass die Planung des CO₂-Preises mindestens in diesem Zeitraum öffentlich bekannt ist und dass dieser Planung in hohem Maße vertraut wird.

4.2 Ergebnisse

Die Ergebnisdarstellung im Industriesektor fokussiert auf die Veränderung der Energieträgernutzung durch die Sensitivitäten. Die damit verbundenen Einflüsse auf die Treibhausgasemissionen werden in Kapitel 6 dargestellt.

4.2.1 Vorbemerkungen zur Energienutzung

Für ein Verständnis dieser Sensitivitätsberechnungen zum BEHG-Preispfad ist die Unterteilung der Industrie und ihre Zugehörigkeit zu den Bepreisungssystemen wichtig. Wie bereits in Abschnitt 4.1 dargestellt, ist ein Großteil der industriellen Emissionen durch den EU-ETS abgedeckt. Auf Ebene der Energienutzung lässt sich dies ähnlich, basierend auf Subsektoren, unterscheiden (Abbildung 9). Die dem BEHG zurechenbaren Subsektoren Fahrzeugbau, Maschinenbau, Gewinnung von Steinen und Erden, Gummi- und Kunststoffwaren, sonstige chemische Industrie und sonstige Wirtschaftszweige sowie Ernährung und Tabak¹⁵ nutzen zusammen etwa 30 % der Endenergie (214 TWh) im Industriesektor (AGEB 2017). Der EU-ETS-Bereich mit den Subsektoren Metallbearbeitung, Metallerzeugung, NE-Metalle, Papiergewerbe, Glas und Keramik, Grundstoffchemie und Verarbeitung von Steinen und Erden nutzt 70 % der Endenergie (501 TWh, in Summe 715 TWh)¹⁶.

Die vom BEHG betroffenen Sektoren (die das hier untersuchte Preissignal sehen) nutzen Strom (92 TWh) – dessen Emissionen im Sektor Energiewirtschaft bilanziert werden¹⁷ – und Erdgas (76 TWh) sowie nur geringfügig emissionsintensivere Energieträger (12 TWh). Insbesondere durch die Stahlerzeugung bestimmt, nutzt der vom EU-ETS betroffene Bereich noch vor Erdgas (142 TWh) und Strom (133 TWh) andere fossile Energieträger (181 TWh).

Die von CO₂-Preisen ausgehenden Preissignale sind umso wirkungsvoller, je emissionsintensiver die Energienutzung des betroffenen Bereiches ist. Denn dann ist die Preisänderung verglichen mit CO₂-armen oder CO₂-neutralen Energieträgern besonders hoch. Konkret heißt das, dass eine besonders starke Preissteigerung durch BEHG-Preise nur für Energieeinsätze von 12 TWh (emissionsintensive Energieträger) erfolgt, geringfügigere Preissteigerungen wirken auf 76 TWh (Erdgas) und keine auf 93 TWh (Strom und Biomassen sowie Umgebungs- und Fernwärme).

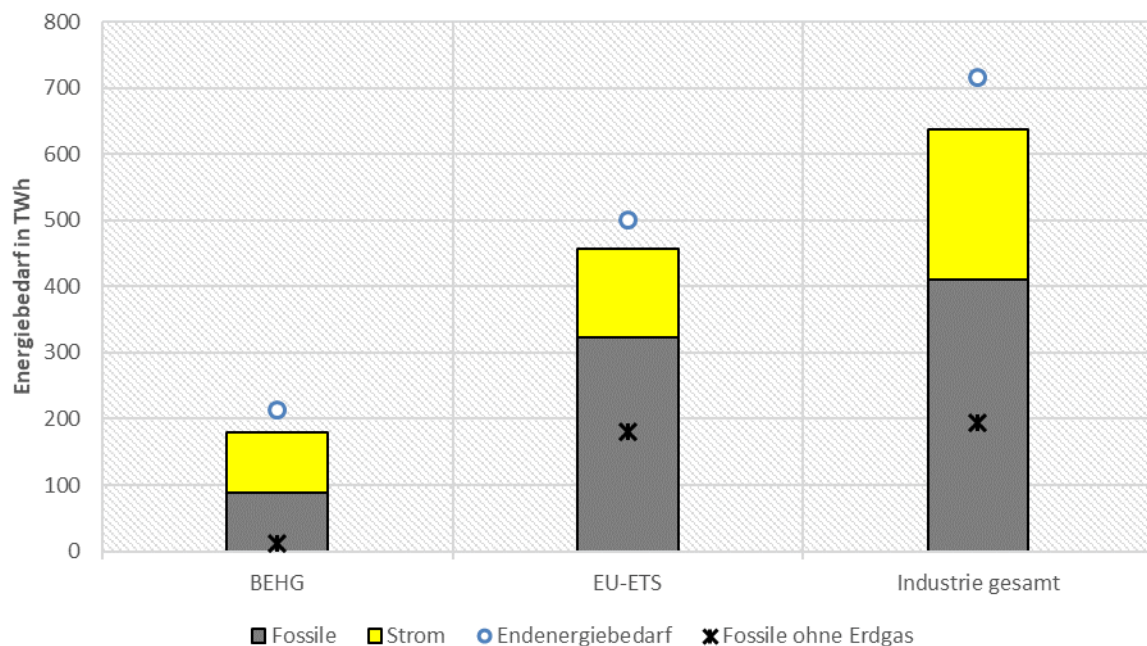
Die Endenergienutzung im BEHG-Bereich ist deutlich kleiner und bereits weniger emissionsintensiv als im EU-ETS. Beides limitiert die Wirkung von Preissignalen auf die Emissionsreduktion in den untersuchten Sensitivitäten: CO₂-basierte Preissignale wirken gegenüber wenig emissionsintensiven Energieträgern spezifisch geringer und absolut betreffen sie nur eine geringe Energiemenge.

¹⁵ Für den Zweck der Darstellung wurde der Subsektor "Ernährung und Tabak" dem BEHG zugeschlagen. Standortspezifisch wird dies variieren, da einzelne Anlagen über ihre Kapazität dem EU-ETS zugeordnet sein können. Eine Verschiebung dieses Subsektors in den EU-ETS-Bereich würde das Bild nochmal verstärken (etwa 40 % der Nutzung fossiler Energie des BEHG in diesem Subsektor). Für die Modellierung wurde der Subsektor dem BEHG zugerechnet. Einzelne Prozesse mit üblicherweise großen Energieanlagen wurden individuell dem EU-ETS zugerechnet (z.B. Zuckerproduktion).

¹⁶ Dieses Verhältnis ist auch 2020 noch beinahe unverändert (31 % zu 69 %).

¹⁷ Dies bedeutet vor allem, dass der Strompreis nicht durch den BEHG beeinflusst wird und Strom auf der Nachfrageseite – auf den Preis bezogen – CO₂-neutral wirkt.

Abbildung 9: Unterteilung der Energienutzung des Industriesektors nach Betroffenheit durch EU-ETS und BEHG (Daten von 2015)



Quelle: Eigene Darstellung nach Daten der AGEB-Energiebilanz

Abbildung 9¹⁸ basiert auf den Energiebilanzen der AGEB. Die in Kapitel 6 dargestellten Ergebnisse sind hingegen auf Inventardaten skaliert. Die maßgeblichen Änderungen zwischen diesen beiden Darstellungen ist eine Umgruppierung der Energieträger, die Kalibrierung auf das Bezugsjahr 2016 und das Herausrechnen der Energieträgernutzung für die Wärmeerzeugung in KWK-Anlagen aus den Energiebilanzen. Damit wird eine Vergleichbarkeit und Zusammenführung aller Sektoren ermöglicht. Die modellierten Effekte der Industrie werden dadurch geringfügig verändert, da eine leichte Verschiebung der Energieträgernutzung zwischen KWK und nicht-KWK stattfindet. Dies beeinflusst die Schlussfolgerungen jedoch nicht maßgeblich.

4.2.2 Sensitivitätseffekte auf Energienutzung

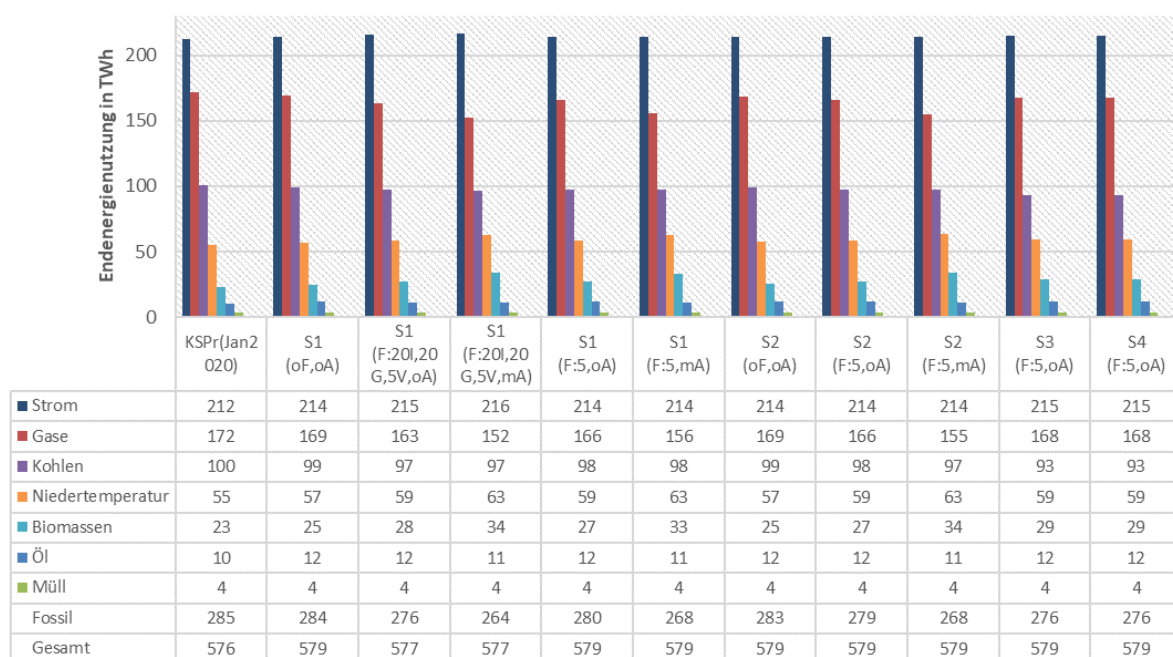
Für die folgende Darstellung der Ergebnisse der Sensitivitätsrechnungen (Abbildung 10) sind die im Modell genutzten Energieträger (13 für die Industrie relevante) gruppiert¹⁹. Es werden die Gruppen Kohlen (Steinkohle, Koks und Braunkohle), Öle (schweres und leichte Heizöl), Strom, Niedertemperaturwärme (Fern- und Nahwärme, Geothermie und Umweltwärme sowie Solarthermie), Müll, Gase (Erdgas, Gichtgas, Raffineriegas, Stadtgas, Kokereigas und sonstige) und Biomassen (fest, gasförmig, flüssig) betrachtet. Als Kategorien sind die Sensitivitäten aufgetragen; gruppiert nach BEHG-Preisfad (1-4) und dem Einfluss von Foresight (0, 5 oder 20 Jahre, "I" markiert den Industriewert²⁰) und Austauschraten (mit "mA" oder ohne "oA" Anpassung der Austauschraten). Innerhalb jeder Sensitivität sind die Energieträgergruppen als Säulen dargestellt.

¹⁸ Differenz zwischen Säulen und "Endenergiebedarf" sind andere Energieträger wie Biomasse und Fernwärme.

¹⁹ Ergebnisse auf Ebene der Treibhausgasemissionen sind in Kapitel 6 dargestellt.

²⁰ Ist der Wert der Voraussicht für alle Sektoren gleich, wird nur "F" genutzt.

Abbildung 10: Einfluss der Sensitivitäten auf die Energieträgernutzung im Sektor Industrie, 2030



Quelle: Berechnungen Fraunhofer ISI

Es lassen sich folgende Beobachtungen machen:

Nach Energieträgern:

Insgesamt erzeugen die berechneten Sensitivitäten keine grundlegende Änderung der **Energieträgernutzung** in der Industrie. Vor dem Hintergrund der dargestellten Aufteilung zwischen BEHG und EU-ETS ist das nicht überraschend – nur ein kleiner Teil der gesamten Energienachfrage der Industrie nimmt das Preissignal des BEHG überhaupt wahr. Allerdings ist hervorzuheben, dass in der stärksten Ausprägung in S1 (F:20I,20G,5V, mA) die fossile Energieträgernutzung um 22 TWh zurückgeht. Dies entspricht 25 % (siehe Abbildung 9) der fossilen Nutzung des BEHG-Bereichs der Industrie im Jahr 2015.

Der **Kohlenbedarf** ist wenig sensitiv. Die Veränderung zum Basiswert im Szenario KSPR (Jan 2020) bewegt sich zwischen 1 und 2 TWh. Lediglich in den Preispfaden 3 und 4 – die einen deutlich schneller ansteigenden CO₂-Preis abbilden – wird eine Reduktion um 7 TWh erreicht. Der Grund dafür ist die Verteilung zwischen BEHG und EU-ETS – nur etwa 5 % der Kohlen werden in Bereich des BEHG genutzt. Der **Strombedarf** ist ebenfalls wenig sensitiv. Er steigt grundsätzlich an, wobei klassische Stromanwendungen (in der Abbildung nicht unterteilt) vernachlässigbar (<0,5 TWh) sinken, während neue Anwendungen, insbesondere Wärmepumpen ansteigen. Das reicht bis zu 4 TWh (etwa 20 %) im Vergleich zu KSPR (Jan 2020) in der Sensitivität S1 mit hoher Foresight und Änderung der Austauschraten S1 (F:20I, 20G, 5V, mA). Anwendungen zur Prozesswärmeerzeugung allerdings, die nicht über starke Effizienzvorteile gegenüber der fossilen Technologie verfügen, werden durch die hier untersuchten Preissignale nicht wirtschaftlich – die bestehende hohe Preisdifferenz zwischen Strom und Erdgas wird durch die Preissignale des BEHG nicht geschlossen²¹. Der **Ölbedarf** steigt in allen Sensitivitäten (auf niedrigem Niveau)

²¹ Insbesondere Elektrodenkessel erreichen bei diesen Bedingungen noch keine im Markt relevante Position. Als Größenordnung lässt sich abschätzen, dass in nicht von Strompreiskomponenten befreiten Industrien der Strompreis etwa 20-30 €/GJ über dem Erdgaspreis liegt (10 €/t kWh gegenüber 2-3 €/t kWh). Um diese Preisdifferenz über die CO₂-Komponente zu kompensieren, ist eine Bepreisung von etwa 500 €/t CO₂ notwendig. Und damit wird noch kein Preisvorteil, sondern gerade Parität der Energieträger erreicht.

leicht an, um etwa 2 TWh²². Dies entspricht in etwa dem Rückgang der emissionsintensiveren Energieträger. **Gase** zeigen die größte Reaktion auf die Sensitivitäten. Darunter ist Erdgas die bestimmende Größe. Die Nutzung geht in allen Sensitivitäten zurück, in der stärksten Ausprägung (wiederum S1 (F:20I,20G,5V,mA)) um 29 TWh (12 %). Aufgrund der hohen Bedeutung von Erdgas für die BEHG-Sektoren (vergleiche Abbildung 9) kann es daher auch als Vergleichsgröße für die Wirkung der Sensitivitäten angesehen werden.

Biomassennutzung steigt in allen Sensitivitäten im Vergleich zum Szenario KSPR (Jan 2020) an. Dies reicht von geringen Zuwächsen (2 TWh) zu, jedenfalls relativ gesehen, sehr hohen Veränderungen (11 TWh, 50 %) in S1 (F:20I,20G,5V,mA) und S2 (F:5,mA). Die **Niedertemperaturwärmenutzung** steigt, getrieben durch Wärmepumpen, ebenfalls in allen Sensitivitäten an. Die höchsten Zuwächse sind mit 8 TWh (15 %) in S1 (F:20I,20G,5V,mA), S1 (F:5,mA) und S2 (F:5,mA) zu verzeichnen.

Nach Sensitivitätskategorien:

Die unterschiedlichen **Preispfade** allein erzielen nur eine geringe direkte Wirkung. Zwischen dem Szenario KSPR (Jan 2020) und den Sensitivitäten S1-S2 ohne weitere Anpassungen der Austauschrate und der Foresight sinkt der Bedarf fossiler Energieträger nur um jeweils 1 TWh. In den Preispfaden S3 und S4 ist die Wirkung höher (-9 TWh), allerdings wird dort auch mit einer Foresight von 5 Jahren gerechnet. Dies bedeutet, dass die alleinige Erhöhung der Attraktivität CO₂-neutraler oder CO₂-armer Technologien für deutliche Emissionsminderungen nicht hinreichend ist. Hinzu kommt, dass durch den linearen Anstieg der hinterlegten Preispfade S1 und S2, auf die die Mehrzahl der berechneten Sensitivitäten entfallen, starke Preissignale teilweise erst spät einsetzen.

Die Veränderung des **Foresight** zeigt im Vergleich der Kategorien eine mittlere direkte Wirkung. Zwischen S1 (oF,oA) und S1 (F:20I,20G,5V,oA) sinkt die Nutzung fossiler Energien um 8 TWh (Unterschied sind 20 Jahre Foresight), zwischen S2 (oF,oA) und S2 (F:5,oA) um 4 TWh (Unterschied sind 5 Jahre Voraussicht). Dies bedeutet, dass die Kenntnis zukünftiger, mindestens plausibel abschätzbarer, Preissignale (für die hinterlegten Preispfade S1 und S2) eine relevante Einflussgröße ist. Für die Preispfade S3 und S4, die einen Sprung im Jahr 2023 beinhalten, dürfte dieser Effekt geringer sein, da die relative Steigerung nach 2023 klein ist. Dies war aber nicht Teil der Sensitivitäten. Aufgrund der insgesamt geringen verbleibenden Zeit für den Austausch des Anlagenbestandes sind diese frühen Preissignale besonders wirksam.

Die bei Weitem stärkste direkte Wirkung hat die Erhöhung der **Austauschraten**. Zwischen S1 (F:20I,20G,5V,oA) und S1 (F:20I,20G,5V,mA) sinkt die Nutzung fossiler Energieträger um 12 TWh, zwischen S2 (F:5,oA) und S2 (F:5,mA) um 9 TWh. Das bedeutet, dass der Flaschenhals der Dekarbonisierung in den untersuchten Sensitivitäten der Austausch der Anlagen ist. Dies wurde allerdings immer in Verbindung mit einem relevanten Preissignal untersucht. Es ist zu erwarten (aber nicht untersucht), dass eine nicht mit Preissignalen verknüpfte Erhöhung der Austauschraten eine geringere Wirkung entfaltet.

Mit der Nutzung fossiler Energieträger als Vergleichsgröße der Wirkung lassen sich die Beobachtungen zu den Kategorien der Sensitivitäten auch graphisch darstellen (Abbildung 11). Diese Abbildung ist folgendermaßen zu lesen: Der Ausgangspunkt ist in der ersten Kategorie das KSPR-Szenario mit etwa 285 TWh fossiler Energieträgernutzung. Durch die Erhöhung der BEHG-Preise (grüne Pfeile) zu den beiden Sensitivitäten S1 (oF, oA) und S2 (oF, oA) werden weniger fossile Brennstoffe genutzt. Durch Anpassung der Preisvoraussicht (gelbe Pfeile) und der Austauschraten (blaue Pfeile), gelangt man zu den weiteren Sensitivitäten mit entsprechenden

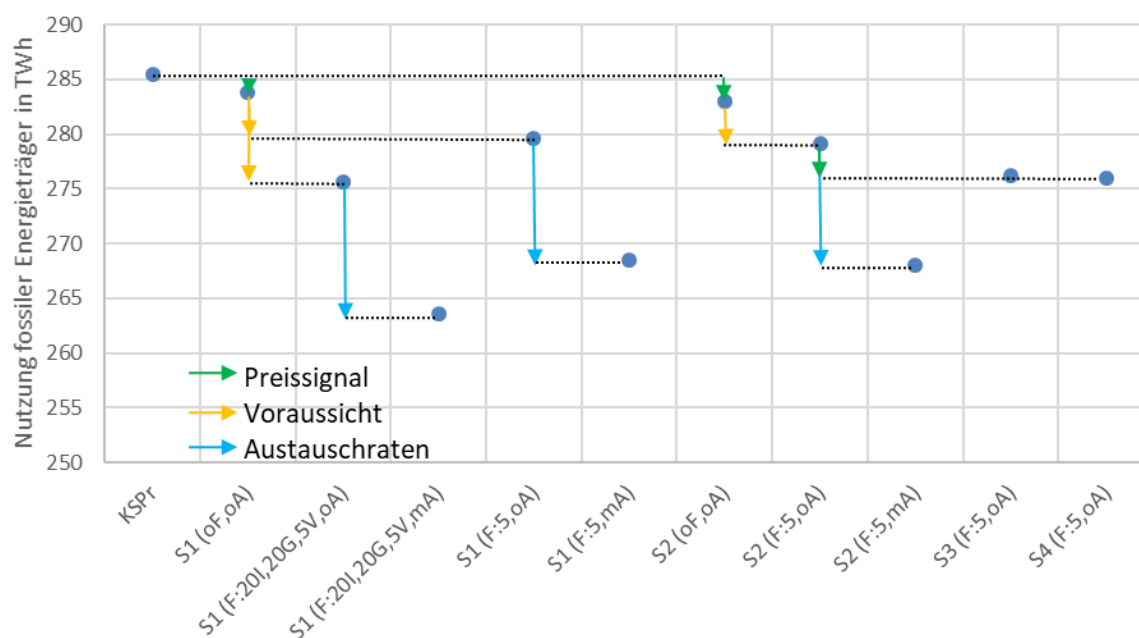
²² Aufgrund der insgesamt geringen Bedeutung flüssiger Energieträger wird dieser Effekt jedoch nicht als bedeutsam eingeschätzt.

Minderungen der Nutzung fossiler Brennstoffe. Die jeweils durch Pfeile verbundenen Punkte bauen stets aufeinander auf.

Die Trennung der Effekte (direkte Wirkung des Preissignals auf Technikattraktivität, Voraussicht, Austauschraten) ist künstlich und modellbedingt bzw. durch die Ausgestaltung der Sensitivitäten erzeugt. In der Realität wird ein hinreichend hohes Preissignal sowohl zu einer vorausschauenden Beschäftigung der Unternehmen mit Preiserwartungen als auch zu früherem Austausch bestehender Anlagen führen²³. Daher ist die Interaktion der Effekte für die Beurteilung maßgeblich. Letztlich ist ein Zusammenspiel aller Kategorien am effektivsten: Eine hohe Attraktivität CO₂-armer Technologien und deren Installation, beschleunigt durch früheren Austausch von fossilen Bestandsanlagen und unterstützt durch verlässliche Preiserwartungen, die Preissignale wirken lassen, bevor sie tatsächlich in Kraft treten.

Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass CO₂-Preise eine wichtige Rolle bei der Dekarbonisierung haben. Gleichzeitig wird auch deutlich, dass nur bei einem stabilen, gut planbaren Preissignal spürbare Minderungswirkungen möglich sind. Die Lenkungswirkung der CO₂-Bepreisung erhöht sich beträchtlich, wenn auch die Bestandserneuerung in Richtung dekarbonisierter Techniken angestoßen und beschleunigt werden kann.

Abbildung 11: Wirkung der Sensitivitäten auf die Nutzung fossiler Energieträger im Jahr 2030, nach Kategorie



Quelle: Berechnungen Fraunhofer ISI

²³ Zusätzlich kann die Austauschrate auch durch andere regulatorischen Instrumente erhöht werden. Wie in Abschnitt 4.1.2 dargestellt, liegen empirische Daten in hinreichender Detailtiefe nicht vor, sodass die Quantifizierung der Austauschraten eine Annahme ist. Abweichungen in positive oder negative Richtung lassen sich beide plausibel argumentieren.

5 Gebäude

5.1 Annahmen

Die Berechnung der CO₂-Preissensitivität der Treibhausgasemissionen im Gebäudesektor wird mit dem agentenbasierten Simulationsmodell Invert/ee-lab abgebildet. Grundlage des Modells ist eine detaillierte Darstellung des Gebäudebestands nach Gebäudetypen, Baualtersklassen und Sanierungszuständen mit relevanten bauphysikalischen und ökonomischen Parametern einschließlich der Technologien zur Bereitstellung von Raumwärme, Warmwasser und Klimatisierung. Darauf aufbauend wird der Heiz- und Kühlenergiebedarf unter Einbeziehung von Nutzerverhalten und Klimadaten ermittelt. Die Investitionsentscheidung in Technologien und Effizienzmaßnahmen wird unter Berücksichtigung von investorenspezifischen Entscheidungskalkülen und Hemmnissen sowie Energieträgerpotenzialen im Modul INVERT-Agents ermittelt. Um das „Mieter-Vermieter-Dilemma“ zu berücksichtigen, sind bei der Entscheidung von Sanierungsmaßnahmen im vermieteten Gebäudebereich nicht die Energiekosten relevant, sondern die aus der Investition resultierende Modernisierungsumlage (Kranzl et al. 2013; Müller 2015; Steinbach 2015).

5.1.1 Einfluss des CO₂-Preises auf den Brennstoffwechsel

Bei der Modellierung werden die Inputdaten gegenüber der Modellierung des Szenarios KSP_r (Jan 2020) konstant gehalten bis auf die jeweilige Änderung der Energiepreise für die Endverbraucher. Durch eine Erhöhung der CO₂-Preise verändern sich die Energiepreise und damit die Energiekosten für die Gebäudeeigentümer bzw. die Energiekosteneinsparungen der verschiedenen Technologieoptionen. Während bei umfangreichen Sanierungsmaßnahmen die Modernisierungsumlagen neben den Investitionen bei den Vermietern in die Entscheidungsmodellierung eingeht, sind zumindest beim Heizsystemwechsel im Modell auch für die Vermieter die Energie- und Betriebskosten relevant, auch wenn dem Entscheidungskalkül „Energiekosten“ eine geringere Bedeutung zufällt als bei einem selbstnutzenden Eigentümer.

Im Modell werden für jedes Simulationsjahr Referenzgebäude-spezifisch die Investitionen, Betriebs- und Energiekosten sowohl für die zur Auswahl stehenden energetischen Sanierungsmaßnahmen und Wärmeversorgungssysteme berechnet. Dies dient als Grundlage zur Berechnung der jeweiligen Marktanteile, die nicht nur für jedes Referenzgebäude, sondern auch differenziert nach Investortyp ermittelt werden. Darauf aufbauend berechnet das Modell die Veränderung des Nutz- und Endenergiebedarfs sowie des Energieträgermixes für den gesamten Gebäudebestand. Die Veränderung der Energiepreise durch die Variation der CO₂-Preispfade wirken sich im Modell somit endogen auf eine Veränderung der Investitionsentscheidung aus, nicht aber auf eine Nutzungsänderung, z.B. dass weniger geheizt wird aufgrund der Preissteigerung. Ein Effekt auf den Betrieb der Wärmeversorgung bei hohen Preissteigerungen ist grundsätzlich jedoch möglich und würde zu einer weiteren Reduktion des Wärmebedarfes führen.

5.1.2 Einfluss der Austauschraten auf die Technologiediffusion

Tabelle 5 zeigt die Lebensdauern von Wärmeversorgungssystemen mit und ohne Anpassung der Austauschraten. Bei der Berechnung der Sensitivitäten werden im Modell auf 75 % verkürzte Lebensdauern von Wärmeversorgungssystemen angenommen, um den Effekt höherer Austauschraten aufgrund höherer CO₂-Preise abzubilden. In Kombination mit dem steigenden CO₂-Preis erfolgt damit ein schnellerer Umstieg auf EE-Wärme bzw. Fernwärme.

Tabelle 5: Lebensdauer von Wärmeversorgungssystemen im Gebäudesektor mit und ohne Anpassung

	Lebensdauer ohne Anpassung [Jahre]	Lebensdauer mit Anpassung [Jahre]
Fernwärme	60	45
Heizöl Einzelöfen und Zentralheizung	40	30
Biomasse Zentralheizung	25	18,75
Biomasse Einzelöfen	40	30
Gaswärmepumpe	25	18,75
Wärmepumpe	25	18,75
Stromheizung	40	30
Erdgas Zentralheizung	25	18,75

Quelle: Annahmen IREES

5.1.3 Übersicht über die Annahmen in den Sensitivitäten

- **„Basis-Szenario“:** Annahmen wie im Szenario KSPR (Jan 2020), die Modellierung erfolgt allerdings nach neuem Modell-Standard sowie auf Basis aktualisierter statistischer Daten im Jahr 2018.
- **„Foresight“:** Bei Investitionen in die Gebäudehülle und in Wärmeversorgungssysteme werden zukünftige Entwicklungen der Energiepreise bzw. des CO₂-Preises berücksichtigt. Dabei wird entsprechend VDI 2067²⁴ die Annuität der Energiepreisentwicklung über 5 bzw. 10 Jahre – je nach Sensitivität – bei der Investitionsentscheidung berücksichtigt. Die zukünftigen Energiepreis- bzw. Energiekostensteigerung werden dann auf das Jahr der Investitionsentscheidung mit einem kalkulatorischen Zinssatz von 2 % abgezinst. Im Gegensatz zum „Basis-Szenario“ wird damit davon ausgegangen, dass der Investor / Gebäudeeigentümer die Entwicklung der CO₂-Preises über einen gewissen Zeitraum kennt und die daraus resultierenden steigenden zukünftigen Energiekosten bei der Investitionsentscheidung berücksichtigt.
- **„Foresight + Austauschraten“:** Zusätzlich zu „Foresight“ verkürzt sich die Lebensdauer der Wärmeversorgungssysteme bei steigenden CO₂-Preisen.

5.2 Ergebnisse

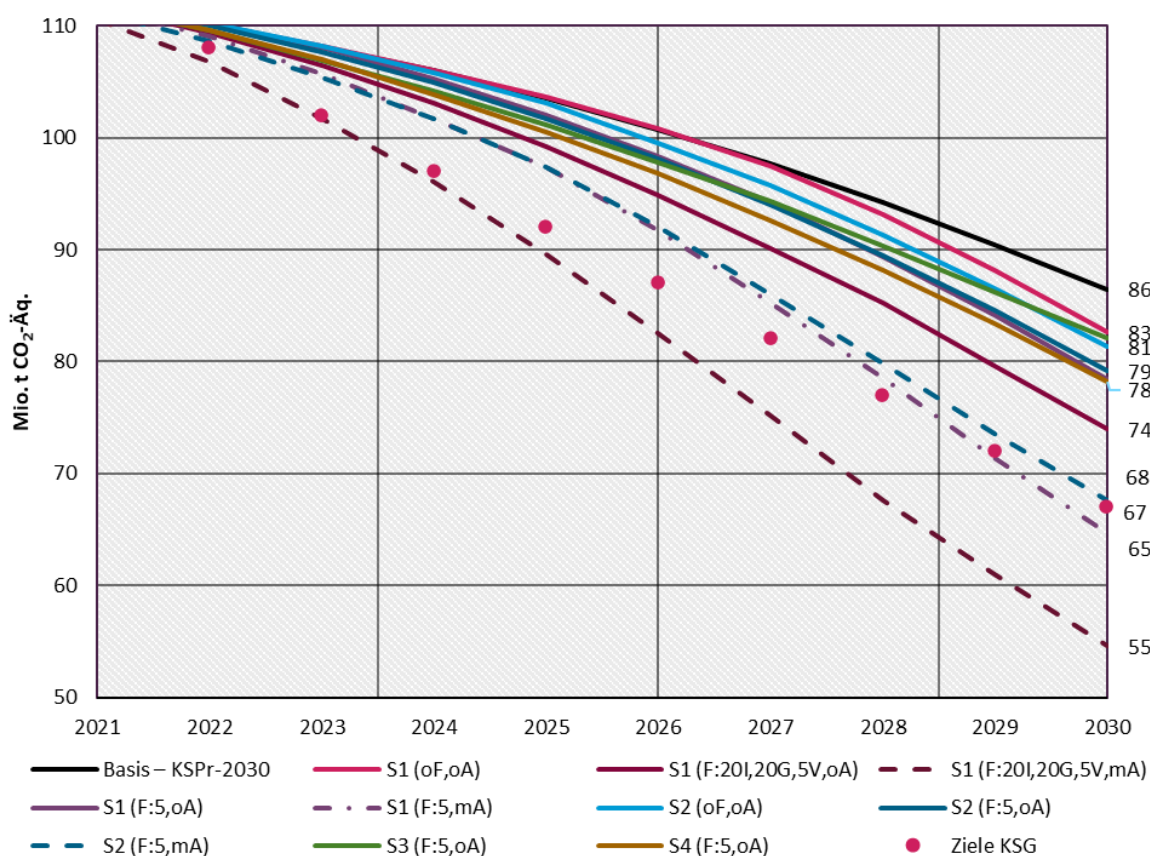
Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse umfassen die Ergebnisse für den Gebäudesektor nach Abgrenzung im KSG. Modelliert wird der Effekt der verschiedenen Preispfade auf die Entwicklung der Treibhausgasemissionen aus der thermischen Konditionierung der Gebäude (private Haushalte, GHD-Sektor). Die Entwicklung der Treibhausgasemissionen aus Geräten und Prozessen, die

²⁴ VDI 2067-1. (2012). VDI Richtlinie: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung. Beuth Verlag. <http://www-fr.redi-bw.de/db/perinorm/>

nach KSG dem Gebäudebereich zugeordnet sind, jedoch nur einen geringfügigen Anteil ausmachen, werden entsprechend des Szenarios KSP_r (Jan 2020) angesetzt²⁵.

Abbildung 12 verdeutlicht die Minderungspfade der CO₂-Preis-Sensitivitäten über den Zeitraum 2021 bis 2030. In den Sensitivitäten S1 (F:20I, 20G, 5V, mA), S1 (F5, mA) und S2 (F:5, mA) sinken die Treibhausgasemissionen aufgrund des früheren Austauschs fossiler Wärmeversorgungssysteme besonders deutlich. Nur die Sensitivitäten mit angepassten Austauschraten erreichen bzw. unterschreiten die KSG (2021)-Ziele (novellierte Fassung 2021). In der Sensitivität S1 (F:20I, 20G, 5V, mA) wird das KSG (2021)-Ziel mit 55 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 2030 sogar um 12 Mio. t CO₂-Äq unterschritten. In der Sensitivität S1 (F:5, mA) wird das KSG (2021)-Ziel um 2 Mio. t CO₂-Äq unterschritten, während in der Sensitivität S2 (F:5, mA) das KSG (2021)-Ziel nur knapp um 1 Mio. CO₂-Äq verfehlt wird. In der Sensitivität S1 (F:20I, 20G, 5V, oA) werden aufgrund der antizipierten Steigerung der CO₂-Preise über 20 Jahre auch ohne Anpassung der Austauschraten deutlich geringere Treibhausgasemissionen als im Basis-Szenario erreicht. Nichtsdestotrotz wird das KSG (2021)-Ziel verfehlt.

Abbildung 12: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Basis-Szenario und den CO₂-Preis-Sensitivitäten im Gebäudesektor im Vergleich mit den Zielen des KSG (2021), 2021-2030



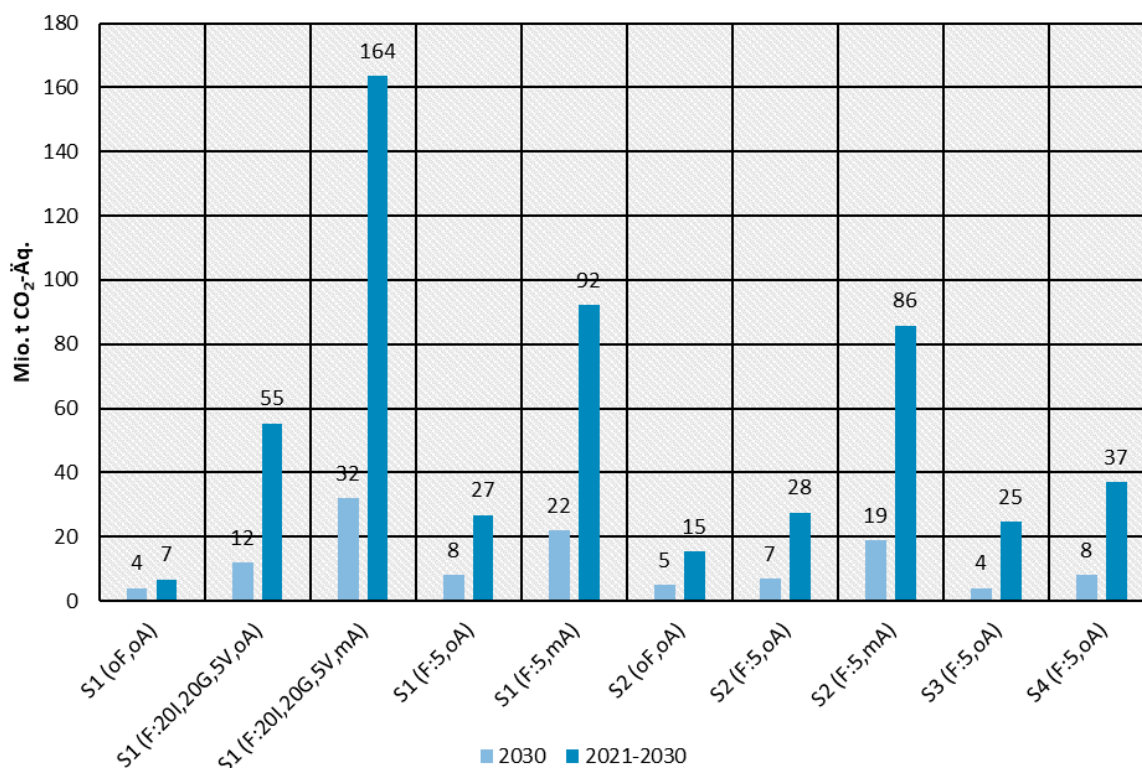
Quelle: Berechnungen IREES

²⁵ Die Treibhausgasemissionen, die nicht der thermischen Konditionierung von Gebäuden zuzuordnen sind, nach KSG jedoch im Gebäudesektor bilanziert werden, betragen im Szenario KSP_r (Jan 2020) 3,6 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 2020 und sinken auf 2,3 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 2030.

Der schnell ansteigende CO₂-Preis in den Preispfaden 3 und 4 bis 2023 führt im Vergleich zu den Sensitivitäten S1 (F:5, oA) und S2 (F:5, oA) zu höheren Treibhausgaseinsparungen in den Jahren bis 2027. Ab 2027 steigt der CO₂-Preis in den Preispfaden 3 und 4 jedoch langsamer, was zu einer Verlangsamung der Treibhausgasreduktion führt. In der Sensitivität S3 (F:5,oA) verbleiben 2030 Treibhausgasemissionen von rund 80 Mio. t CO₂-Äq, in der Sensitivität S4 (F:5,oA) Treibhausgasemissionen von rund 76 Mio. t CO₂-Äq.

Abbildung 13 zeigt den Treibhausgasminderungsbeitrag der Sensitivitäten im Gebäudesektor gegenüber dem Basis-Szenario (KSP_r (Jan 2020)) für das Jahr 2030 sowie kumuliert für die Periode 2021-2030. Im Vergleich zum Basis-Szenario mit einem CO₂-Preis von 125 €/t im Jahr 2030, können in den betrachteten CO₂-Preis-Sensitivitäten bei einem Anstieg der Preise auf 240 bis 346 €/t zusätzlich 4 bis 32 Mio. t CO₂-Äq eingespart werden. Vor allem die Anpassung der Austauschraten in Form von kürzeren Lebensdauern der Wärmeversorgungssysteme sind ausschlaggebend für Treibhausgasminderungen. Darüber hinaus ist auch die Annahme „Foresight“ (F) für die Geschwindigkeit und Höhe der Treibhausgasreduktion entscheidend. In der Abbildung wird deutlich, dass eine Antizipation der steigenden CO₂-Preise über den langen Zeitraum von 20 Jahren deutlich effektiver ist als ein kurzer Zeitraum von fünf Jahren.

Abbildung 13: Treibhausgasminderungsbeitrag der CO₂-Preis-Sensitivitäten im Sektor Gebäude, 2030 sowie kumuliert 2021-2030



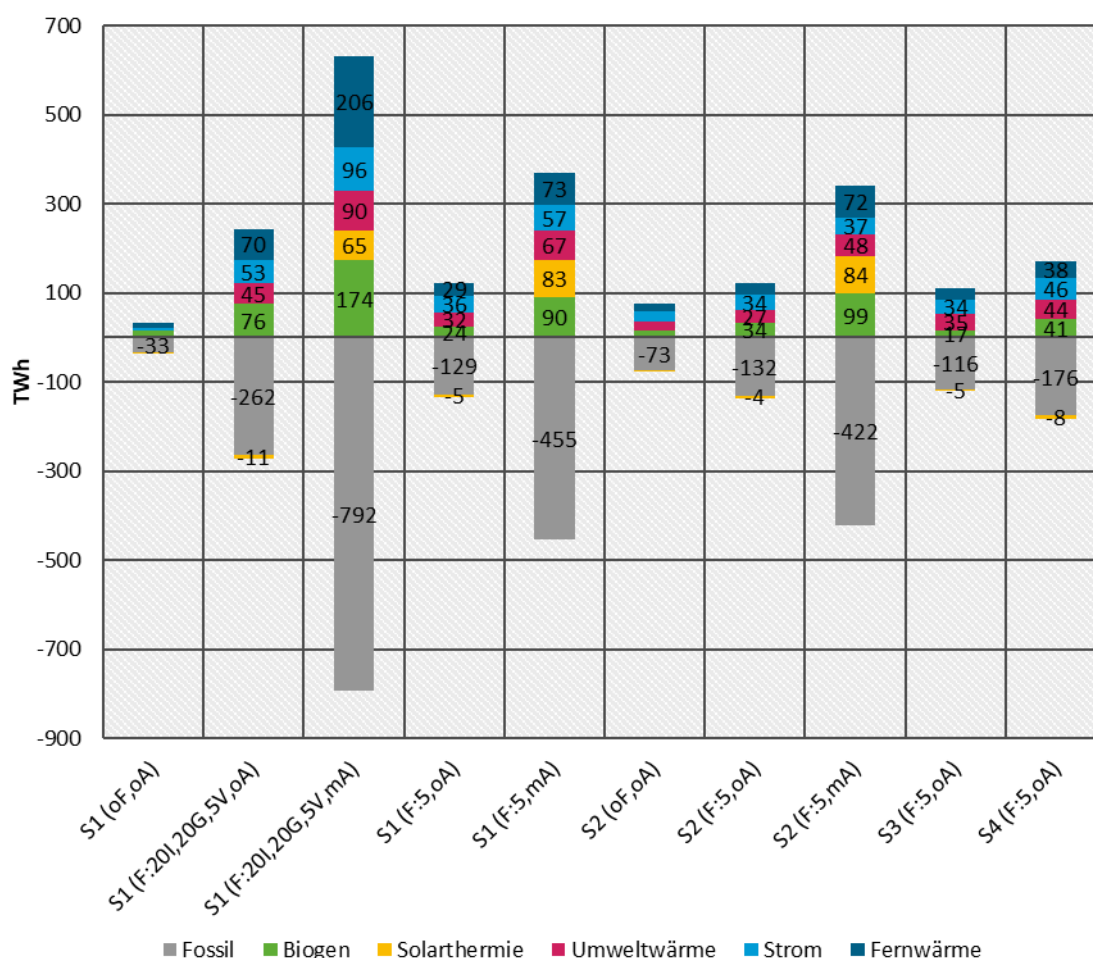
Quelle: Berechnungen IREES

In der Sensitivität mit der längsten Foresight von 20 Jahren S1 (F:20I, 20G, 5V, mA) und mit angepassten Austauschraten sind die Treibhausgasminderungen im Jahr 2030 sowie die kumulierten Treibhausgasminderungen im Vergleich zum Basis-Szenario am höchsten. Daneben erreichen auch die Sensitivitäten S1 (F:5, mA) sowie S2 (F:5, mA) deutlich höhere Treibhausgaseinsparungen als diejenigen Sensitivitäten ohne Anpassung der Austauschraten. Über den Zeitraum 2021 bis 2030 erzielt bei den Sensitivitäten, die keine angepassten Austauschraten

berücksichtigen, Preispafe 4 (Sensitivität S4 (F:5,oA)) die höchsten Einsparungen. Die geringsten Einsparungen werden in S1 (oF,oA) erzielt.

Abbildung 14 zeigt die Veränderung des Endenergieverbrauchs nach Energieträgern im Gebäudesektor über den Simulationszeitraum gegenüber dem Basis-Szenario. Darin wird deutlich, dass in der Sensitivität S1 (F:20I, 20G, 5V, mA) aufgrund der angepassten Austauschraten am meisten EE-Wärme, Solarthermie und Fernwärme zugebaut wird. Über den Simulationszeitraums werden insgesamt knapp 800 TWh weniger fossile Brennstoffe eingesetzt als im Basis-Szenario. In den Sensitivitäten mit angepassten Austauschraten wird deutlich mehr EE-Wärme, Fernwärme und Solar zugebaut als in den Sensitivitäten ohne angepassten Austauschraten. Die über 20 Jahre antizipierten CO₂-Preise in der Sensitivität S1 (F:20I, 20G, 5V, mA) führen jedoch zu einem deutlich höheren Austausch als die Sensitivitäten mit nur fünf Jahren Foresight. Daneben wird auch in der Sensitivität S4 (F:5, oA) mit Preispafe 4 aufgrund des schnell steigenden CO₂-Preises bereits im Jahr 2023 eine deutliche höhere Reduktion der fossilen Energieträger als im Basis-Szenario erzielt.

Abbildung 14: Veränderung des EEV nach Energieträgern im Gebäudesektor gegenüber dem Basis-Szenario (KSPR (Jan 2020)), kumuliert von 2021 bis 2030

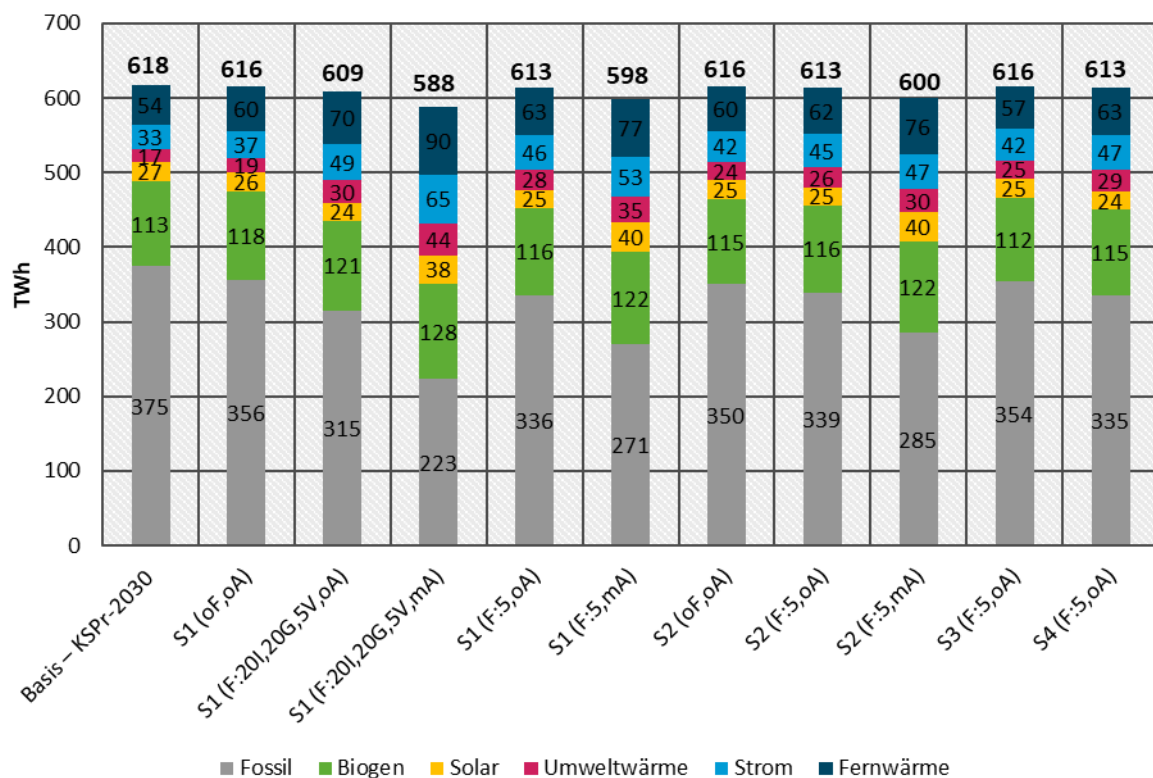


Quelle: Berechnungen IREES

Abbildung 15 zeigt den Endenergieverbrauch nach Energieträgern im Vergleich der CO₂-Preissensitivitäten im Jahr 2030. Es wird deutlich, dass in den meisten Sensitivitäten der

Endenergiebedarf im Vergleich zum Basis-Szenario nahezu unverändert ist. Nur die Sensitivitäten mit intensivem Austausch der fossilen Wärmeversorgungssysteme erzielen einen bis zu 5 % geringeren Endenergiebedarf im Jahr 2030. Daneben wird, wie in Abbildung 14 ersichtlich, auch ein größerer EE-Zubau erreicht. In der Sensitivität S1 (F:20I, 20G, 5V, mA) verbleiben im Jahr 2030 nur 223 TWh fossile Brennstoffe. Im Vergleich zum Basis-Szenario bedeutet das eine Reduktion um 40 %.

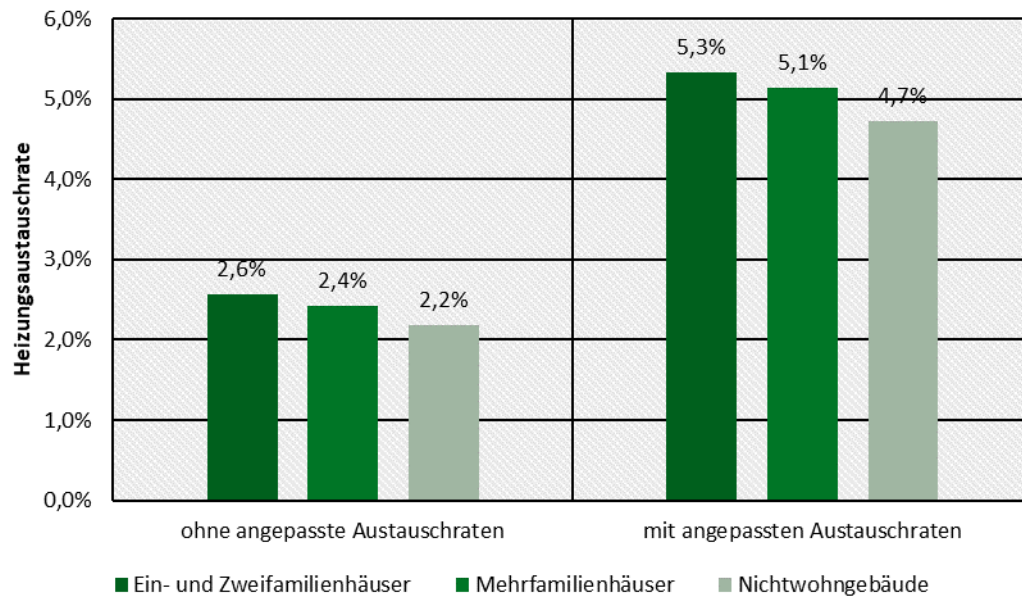
Abbildung 15: Endenergieverbrauch nach Energieträgern im Vergleich der CO₂-Preis-Sensitivitäten im Gebäudesektor im Jahr 2030



Quelle: Berechnungen IREES

Abbildung 16 vergleicht die resultierenden Austauschraten für Wärmeversorgungssysteme. In Sensitivitäten mit der Annahme, dass Wärmeversorgungssysteme aufgrund des steigenden CO₂-Preises schneller getauscht werden, erhöht sich die Heizungsaustauschrate auf rund 5 %. In Sensitivitäten, in denen keine kürzeren Lebensdauern der Wärmeversorgungssysteme angenommen werden, ist die Heizungsaustauschrate deutlich geringer.

Abbildung 16: Höhe der Heizungsaustauschrate nach Gebäudetyp in Sensitivitäten mit und ohne angepasste Austauschrate



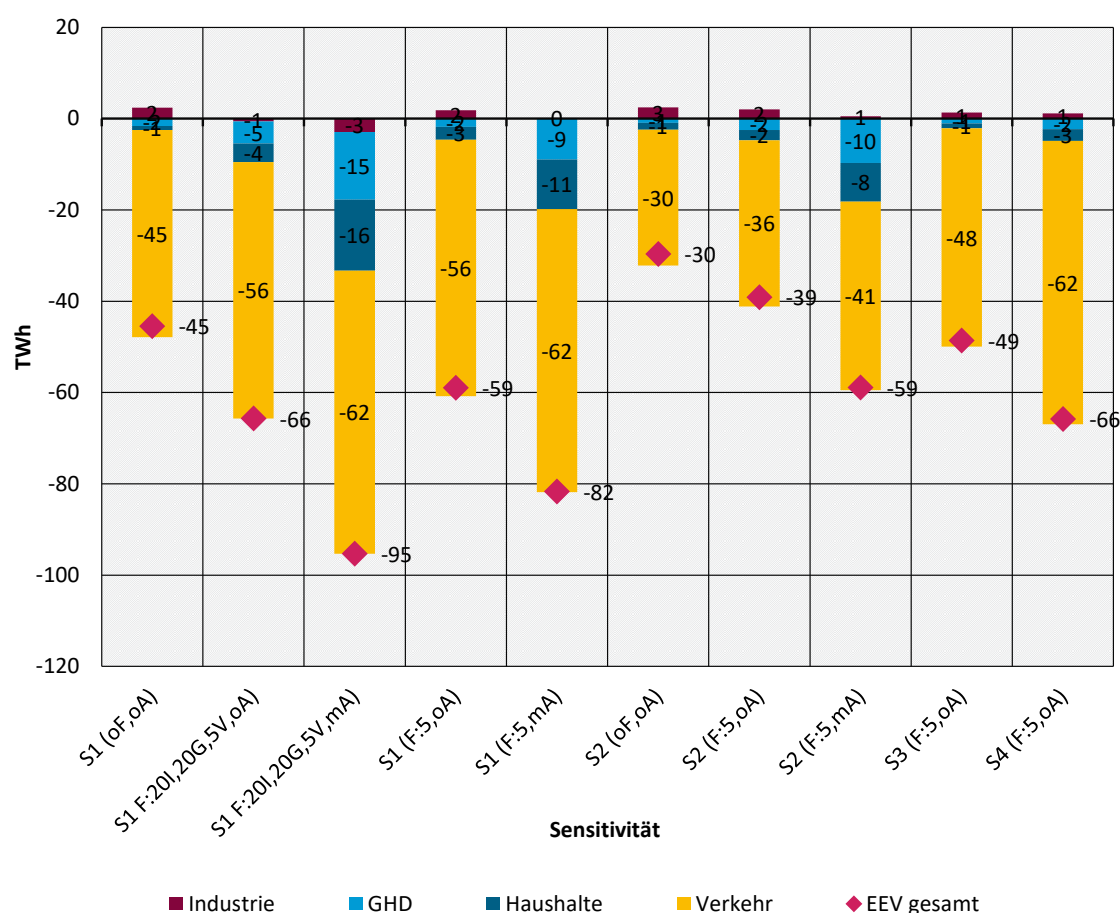
Quelle: Berechnungen IREES

6 Gesamtergebnisse

Der CO₂-Preis bewirkt in den Sektoren sowohl Energieeinsparungen als auch Energieträgerwechsel.

Die Wirkung auf die Höhe der Endenergieverbräuche (EEV) zeigt Abbildung 17. Am stärksten werden in den Sensitivitäten die Endenergieverbräuche im Verkehr reduziert, gefolgt von den Gebäuden, die in Abbildung 17 entsprechend der Struktur der Energiebilanz noch weiter in Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) sowie (private) Haushalte unterteilt sind. Bei den Gebäuden und im Verkehr haben neben den CO₂-Preispfaden auch die Annahmen zu Foresight und Austauschraten deutliche Wirkung auf die Höhe der Endenergieverbräuche. In der Industrie hingegen, wo nur ein kleiner Teil der Emissionen vom BEHG betroffen ist, haben die CO₂-Preissensitivitäten nur geringe Auswirkung auf die Höhe des Endenergieverbrauchs. Hinzu kommt, dass ein Energieträgerwechsel in der Prozesswärme nicht mit so deutlichen Effizienzgewinnen wie bei elektrischen PkW oder Wärmepumpen einher geht. Bei GHD und privaten Haushalten wurden nur Effekte auf die Gebäudewärme ermittelt.

Abbildung 17: Veränderung des EEV nach Sektoren gegenüber dem KSPr*, 2030

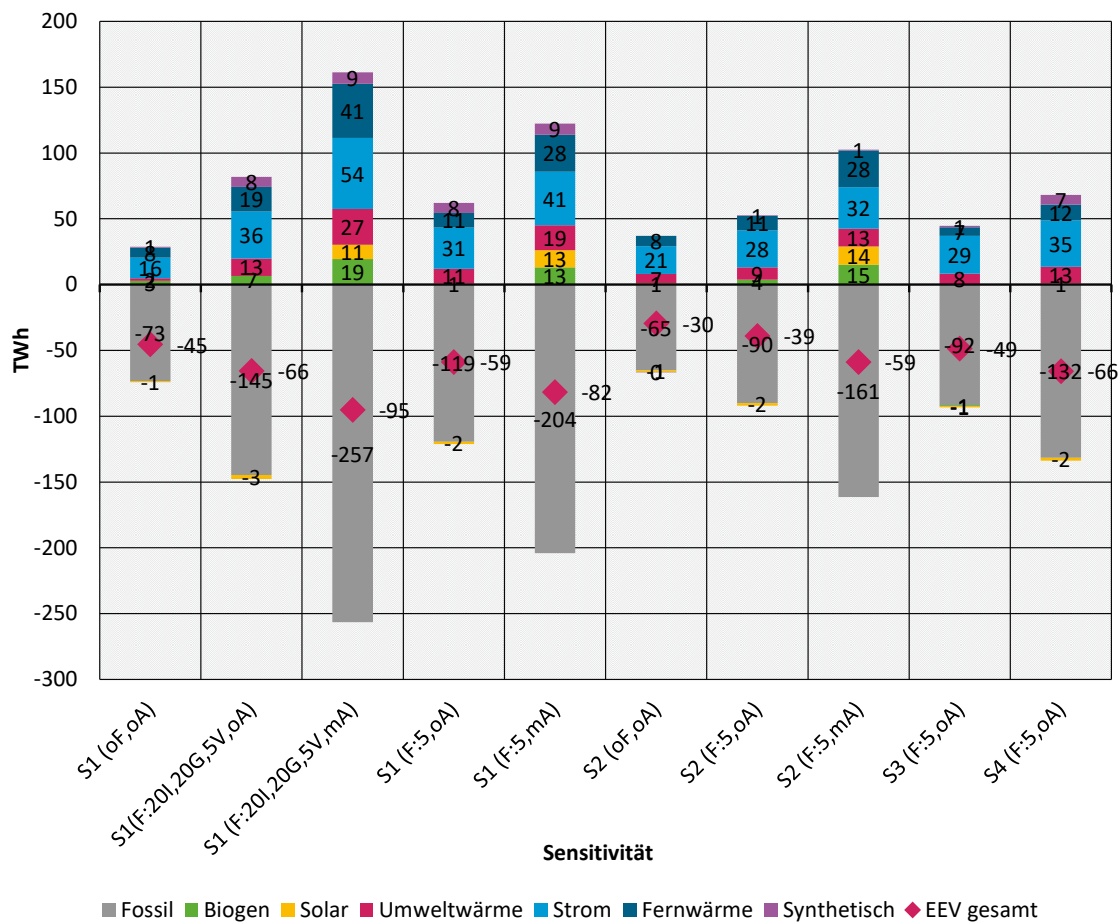


Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut

In Abbildung 18 sind die Effekte der CO₂-Preissensitivitäten auf die Zusammensetzung des Endenergieverbrauchs dargestellt. Es lässt sich ablesen, dass zwischen 37 % und 62 % der Reduktion des Endenergieverbrauchs an fossilen Energieträgern durch eine Reduktion des Endenergieverbrauchs insgesamt und zwischen 38 % und 63 % durch eine Substitution durch Energieträger ohne direkte CO₂-Emissionen zustande kommt: Die Sensitivitäten zeigen zwar auch einen

Wechsel von fossilen Brennstoffen zu biogenen und synthetischen Brennstoffen sowie direkt nutzbare erneuerbare Energie wie Solarenergie und zu über Wärmepumpen bereitgestellte Umweltwärme. Allen Sensitivitäten gemein ist aber, dass der größte Energieträgerwechsel hin zu Strom und Fernwärme erfolgt. Dies hat entsprechende Rückwirkungen auf die Energiewirtschaft, die diese zusätzliche Strom- und Fernwärmenachfrage decken muss.

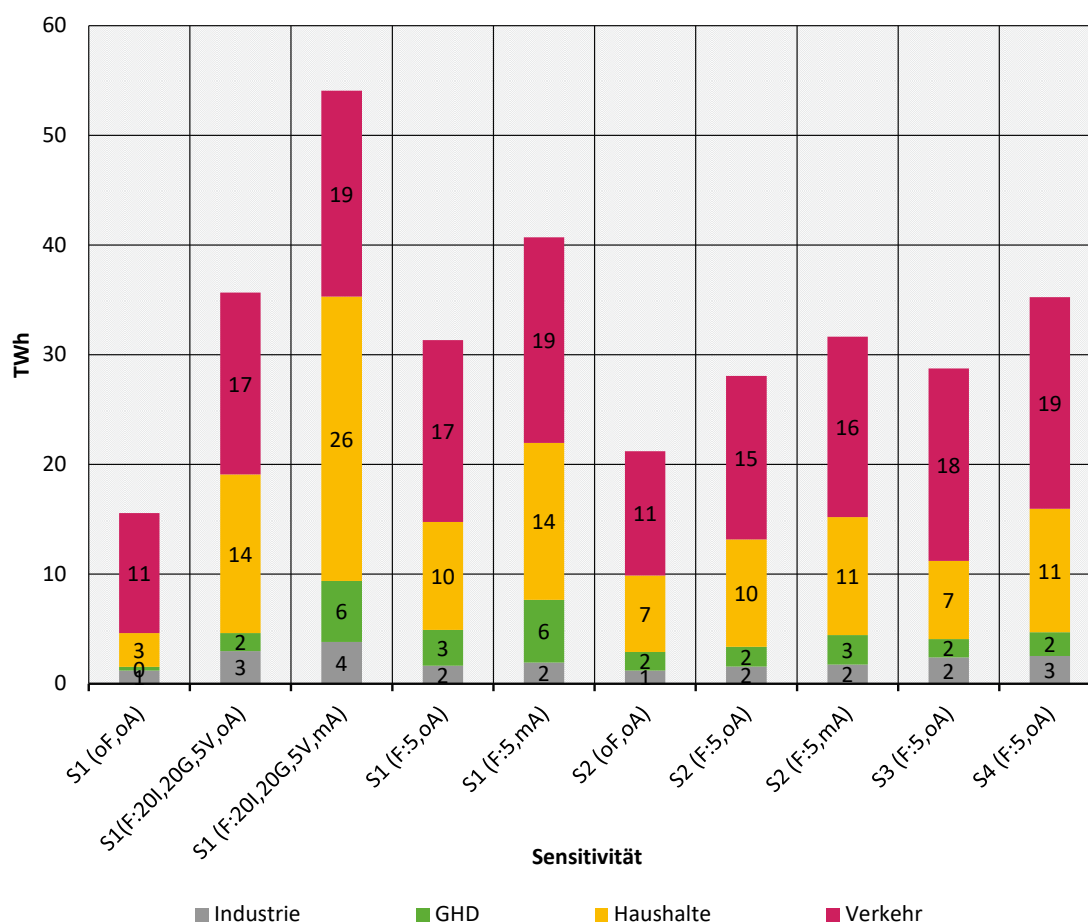
Abbildung 18: Veränderung des EEV nach Energieträgern gegenüber dem KSPr*, 2030



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut

Wegen der für die Energiewirtschaft besonderen Bedeutung des zusätzlichen Stromverbrauchs, ist dieser in folgender Abbildung 19 nach Sektoren aufgeschlüsselt dargestellt. Dabei zeigt sich, dass der Anstieg des Stromverbrauchs in den CO₂-Preissensitivitäten in privaten Haushalten und im Verkehr deutlich größer ist als im GHD-Sektor und in der Industrie. Die Substitution fossiler Brenn- und Kraftstoffe durch Wärmepumpen und Elektromobilität sind in den Sensitivitäten also erwartungsgemäß die deutlichsten Treiber für zusätzliche Treibhausgasemissionen in der Energiewirtschaft.

Abbildung 19: Veränderung des Stromverbrauchs gegenüber dem KSPR*, 2030



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut

In Tabelle 6 sind die in den einzelnen Preissensitivitäten ermittelten Treibhausgasemissionen nach Sektoren des KSG aufgeschlüsselt und den sektoral zulässigen Emissionsmengen gemäß der im Juni 2021 beschlossenen Änderung des Bundes-Klimaschutzgesetzes gegenübergestellt (dargestellt in der Zeile „KSG (2021)-Ziel“). In allen Sensitivitäten sind die Emissionen niedriger als im KSPR*. Dennoch wird bei keiner Sensitivität die gesamt zulässige Emissionsmenge gemäß KSG (2021) erreicht. In den Sensitivitäten S1 (F:20I,20G,5V,mA) und S1 (F:5,mA) erreicht der Gebäudesektor sein Sektorziel für 2030. Die anderen Sektoren erreichen hingegen in keiner der berechneten CO₂-Preissensitivitäten ihr Sektorziel. Die größten Emissionsreduktionen in den Sektoren Industrie und Verkehr werden in der Sensitivität S1 (F:20I,20G,5V,mA) erreicht, wobei diese Sensitivität für den Verkehr identisch mit der Sensitivität S1 (F:5,mA) ist.

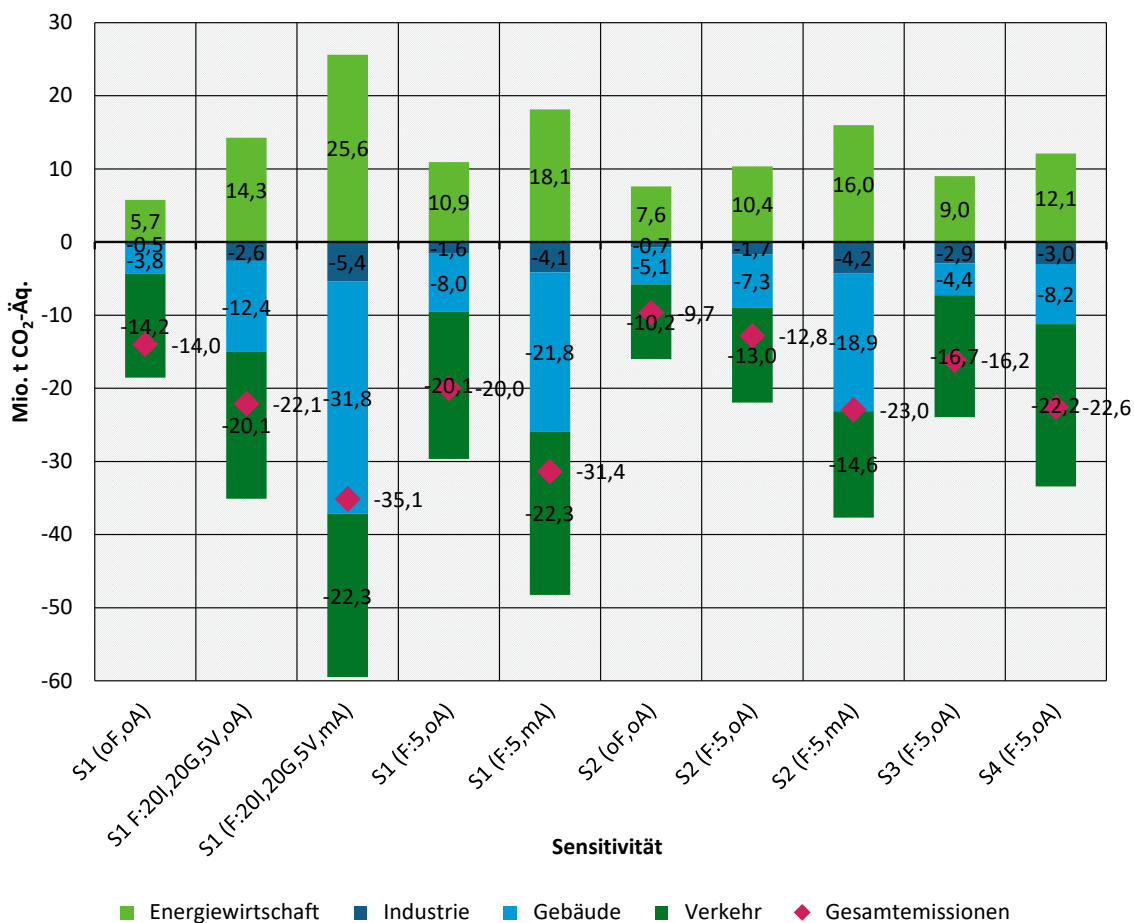
Tabelle 6: Treibhausgasemissionen nach KSG-Sektoren (Mio. t CO₂-Äq), 2030

	Energie- wirt- schaft	Indust- rie	Ge- bäude	Verkehr	Land- wirt- schaft	Abfall- wirt- schaft & Sons- tige	Gesamt	Ände- rung ggü. 1990
KSPr*	187,0	143,2	87,7	128,4	64,1	4,9	615,3	-50,8%
S1 (oF,oA)	192,7	142,7	83,9	114,2	64,1	4,9	602,5	-51,9%
S1 (F:20I,20G,5V,oA)	201,2	140,6	75,3	108,3	64,1	4,9	594,4	-52,5%
S1 (F:20I,20G,5V,mA)	212,6	137,9	55,9	106,1	64,1	4,9	581,4	-53,5%
S1 (F:5,oA)	197,9	141,6	79,7	108,3	64,1	4,9	596,5	-52,3%
S1 (F:5,mA)	205,1	139,1	65,9	106,1	64,1	4,9	585,2	-53,2%
S2 (oF,oA)	194,6	142,5	82,6	118,2	64,1	4,9	606,9	-51,5%
S2 (F:5,oA)	197,3	141,5	80,4	115,5	64,1	4,9	603,7	-51,8%
S2 (F:5,mA)	203,0	139,0	68,8	113,8	64,1	4,9	593,6	-52,6%
S3 (F:5,oA)	196,0	140,3	83,3	111,8	64,1	4,9	600,4	-52,0%
S4 (F:5,oA)	199,1	140,2	79,5	106,2	64,1	4,9	594,0	-52,5%
KSG (2021)-Ziel	108	118	67	85	56	4	438	-65,0%

Quelle: Berechnungen Öko-Institut, Fraunhofer ISI und IREES

Abbildung 20 stellt die Emissionsänderung in den einzelnen Sensitivitäten gegenüber dem KSPr* dar. Darin lässt sich erkennen, dass den Emissionsrückgängen in den Sektoren Industrie, Gebäude und Verkehr ein nicht unerheblicher Anstieg der Emissionen der Energiewirtschaft gegenübersteht. Diese unterliegt überwiegend nicht dem BEHG, sondern dem europäischen Emissionshandel, dessen CO₂-Preise bei allen modellierten Sensitivitäten annahmegemäß unverändert blieben. Zwar sinken in der Energiewirtschaft insbesondere die Emissionen der Raffinerien durch eine reduzierte Nachfrage nach Mineralölprodukten. Gleichzeitig führen aber die erhöhten Strom- und Fernwärmenachfragen zu höheren Emissionen in öffentlichen Kraftwerken und Heizwerken. Dieser Rebound auf die Energiewirtschaft macht je nach Sensitivität zwischen 34 % und 49 % der in den Sektoren Industrie, Gebäude und Verkehr eingesparten Emissionen aus. Da allerdings die Rückwirkungen der Strom- und Fernwärmenachfragen nicht mit einem Strommarktmodell, sondern mit einem stark vereinfachten Ansatz abgebildet wurden, sind die Ergebnisse für die Energiewirtschaft lediglich als indikativ anzusehen.

Abbildung 20: Veränderung der Treibhausgasemissionen gegenüber dem KSPr*, 2030



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut.

Wie Tabelle 7 zeigt, wird nur in sechs der zehn CO₂-Preissensitivitäten die BEHG-Höchstmenge eingehalten. Zudem zeigt die Tabelle auch deutlich, dass eine Einhaltung der BEHG-Höchstmenge nicht gleichzeitig auch die Einhaltung der zulässigen ESR-Emissionen garantiert. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der nationale Emissionshandel entsprechend des Namens des zugrundeliegenden Brennstoffemissionshandelsgesetzes nur die CO₂-Emissionen aus der Verbrennung berücksichtigt. Darüber hinaus gibt es weitere Emissionen. Eine besonders große Bedeutung haben hier die biochemischen Emissionen der Landwirtschaft. Dazu kommen unter anderem die Emissionen aus der Abfallwirtschaft, die Methan- und Lachgasemissionen aus Verbrennungsprozessen, diffuse Emissionen sowie der nicht vom Emissionshandel erfasste Teil der Emissionen aus Industrieprozessen (z.B. die meisten fluorierten Treibhausgase).

Tabelle 7: Zielerreichung ESR (altes 38 %-Ziel) und BEHG (Mio. t CO₂-Äq), 2030

	ESR-Emissionen	Altes ESR-Ziel	Abweichung vom alten ESR-Ziel (-38 %)	Altes ESR-Ziel eingehalten?	BEHG-Emissionen	BEHG-Höchstmenge (altes -38 %-Ziel)	Abweichung von der BEHG-Höchstmenge	BEHG-Höchstmenge eingehalten?
KSP ^r *	343,4	300,6	42,9	Nein	242,2	213,3	28,9	Nein
S1 (oF,oA)	325,2	300,6	24,7	Nein	223,5	213,3	10,2	Nein
S1 (F:20I, 20G,5V,oA)	310,3	300,6	9,8	Nein	207,1	213,3	-6,2	Ja
S1 (F:20I, 20G,5V,mA)	288,2	300,6	-12,3	Ja	182,8	213,3	-30,5	Ja
S1 (F:5,oA)	315,0	300,6	14,4	Nein	212,6	213,3	-0,8	Ja
S1 (F:5,mA)	298,5	300,6	-2,1	Ja	194,1	213,3	-19,3	Ja
S2 (oF,oA)	328,0	300,6	27,4	Nein	226,2	213,3	12,9	Nein
S2 (F:5,oA)	322,8	300,6	22,3	Nein	220,3	213,3	7,0	Nein
S2 (F:5,mA)	309,1	300,6	8,6	Nein	204,6	213,3	-8,7	Ja
S3 (F:5,oA)	321,8	300,6	21,2	Nein	218,4	213,3	5,1	Nein
S4 (F:5,oA)	312,3	300,6	11,8	Nein	208,9	213,3	-4,4	Ja

Quelle: Berechnungen Öko-Institut, Fraunhofer ISI und IREES

Das verschärfte ESR-Ziel (-50 % ggü. 2005) wird in keiner CO₂-Preissensitivitäten eingehalten, wie Tabelle 8 zeigt. Mit der Verschärfung des ESR-Ziels geht automatisch eine niedrigere BEHG-Höchstmenge einher. Diese niedrigere BEHG-Höchstmenge wird in keiner der CO₂-Preissensitivitäten eingehalten. Die Überschreitung der Höchstmengen unterscheidet sich dabei deutlich in den Sensitivitäten. Die niedrigste Überschreitung tritt in der CO₂-Preissensitivität S1 (F:20I,20G,5V,mA) mit knapp 11 Mio. t CO₂-Äq auf, die höchste Überschreitung in der Sensitivität S2 (oF,oA) mit gut 54 Mio. t CO₂-Äq.

Tabelle 8: Zielerreichung ESR (neues -50 %-Ziel) und BEHG (Mio. t CO₂-Äq), 2030

	ESR-Emissionen	Neues ESR-Ziel	Abweichung vom neuen ESR-Ziel (-50 %)	Neues ESR-Ziel eingehalten?	BEHG-Emissionen	BEHG-Höchstmenge (neues -50 %-Ziel)	Abweichung von der BEHG-Höchstmenge	BEHG-Höchstmenge eingehalten?
KSP ^r *	343,4	242,2	101,2	Nein	242,2	172,0	70,2	Nein
S1 (oF,oA)	325,2	242,2	83,0	Nein	223,5	172,0	51,5	Nein
S1 (F:20I, 20G,5V,oA)	310,3	242,2	68,1	Nein	207,1	172,0	35,1	Nein
S1 (F:20I, 20G,5V,mA)	288,2	242,2	46,0	Nein	182,8	172,0	10,8	Nein
S1 (F:5,oA)	315,0	242,2	14,4	Nein	212,6	172,0	40,6	Nein
S1 (F:5,mA)	298,5	242,2	72,8	Nein	194,1	172,0	22,1	Nein
S2 (oF,oA)	328,0	242,2	85,8	Nein	226,2	172,0	54,2	Nein
S2 (F:5,oA)	322,8	242,2	80,6	Nein	220,3	172,0	48,3	Nein
S2 (F:5,mA)	309,1	242,2	66,9	Nein	204,6	172,0	32,6	Nein
S3 (F:5,oA)	321,8	242,2	79,6	Nein	218,4	172,0	46,4	Nein
S4 (F:5,oA)	312,3	242,2	70,1	Nein	208,9	172,0	36,9	Nein

Quelle: Berechnungen Öko-Institut, Fraunhofer ISI und IREES

7 Schlussfolgerungen

Hintergrund dieser Analyse ist die Diskussion zur Wirksamkeit von CO₂-Preisen in den vom BEHG abgedeckten Sektoren Verkehr, Gebäude und Brennstoffen in der Industrie. Ausgehend von der Hypothese, dass die Grenzvermeidungskosten in diesen Sektoren höher bzw. die Elastizitäten geringer sind als im Bereich des EU-ETS und sich dadurch auch in einem vollständigen Handel höhere Preise ergeben würden, wurden verschiedene CO₂-Preispfade gewählt, die höher als in vorherigen Analysen (z.B. zum Klimaschutzprogramm 2030) angenommen wurden. In dieser Analyse wirkt der CO₂-Preis nicht allein, sondern er kommt in einem bereits ausdifferenzierten klimapolitischen Instrumenten-Mix zur Anwendung, welcher alle klima- und energiepolitischen Instrumente umfasst, die bis einschließlich dem Klimaschutzprogramm 2030 eingeführt wurden. Im Rahmen der Analyse wurden nur die BEHG-CO₂-Preise variiert und die übrigen preislichen, ordnungsrechtlichen und förderpolitischen Instrumente unverändert belassen.

Aus den Sensitivitätsrechnungen in Bezug auf verschiedene angenommene BEHG-CO₂-Preis-Pfade sowie Annahmen bezüglich der Zeiträume für CO₂-Preiserwartungen (Foresight) bei der Investitionsentscheidung und hinsichtlich der Möglichkeit eines vorzeitigen Austauschs von Investitionsgütern können verschiedene Schlussfolgerungen gezogen werden.

Im Verkehrssektor sinken die Treibhausgasemissionen in den Sensitivitäten auf 106 bis 115 Mio. t CO₂-Äq. Insgesamt werden für die Erreichung des Sektorziels im Verkehr (85 Mio. t CO₂-Äq) damit noch weitere Instrumente zusätzlich zum CO₂-Preis notwendig sein. Ein zügig steigen der CO₂-Preis hat grundsätzlich den Vorteil, dass dadurch eine schnellere Elektrifizierung der Fahrzeuge unterstützt wird. Andererseits sind die Verfügbarkeit von Alternativen wie bspw. dem öffentlichen Verkehr sowie Kapazitäten für den Schienengüterverkehr wesentliche Voraussetzungen für die Verlagerungswirkung und für die Akzeptanz des CO₂-Preises. Veränderungen bei Infrastruktur und ÖV-Angebot erfordern hierbei eine langfristige Perspektive bei Planung und Umsetzung, um die Alternativen verfügbar zu machen.

Im Industriesektor haben Preissignale im BEHG aufgrund der sektoralen Aufteilung zwischen BEHG und EU-ETS nur eine geringe Wirkung auf die Industrie als Ganzes. Die Kombination aus frühen CO₂-Preissignalen, einem verlässlich kommunizierten Preisanstieg und schnellerem Austausch von Bestandsanlagen beeinflusst den adressierten Bereich aber deutlich. In der untersuchten Konstellation wirken, in absteigender Reihenfolge, Änderung der Austauschraten, Foresight und schließlich BEHG-CO₂-Preispfade.

Im Gebäudesektor sinken die Treibhausgasemissionen auf 80 bis 52 Mio. t CO₂-Äq. Das KSG-Ziel (67 Mio. t CO₂-Äq) wird allerdings nur in den beiden Sensitivitäten erreicht, in denen angenommen wird, dass sich die höheren CO₂-Preise nicht nur auf die Wahl des Wärmeversorgungssystems, sondern auch auf einen vorzeitigen Austausch fossiler Heizungen auswirken. Entscheidend ist zudem die Annahme, dass Gebäudeeigentümer*innen die zukünftige Steigerung der CO₂-Preise in Investitionsentscheidungen mit einer Voraussicht von mindestens fünf Jahren antizipieren. Der Vergleich der Sensitivitäten zeigt damit die Relevanz höherer Austauschraten bei gleichzeitigem Umstieg auf zielkonforme Wärmeversorgung. Inwieweit sich ein signifikanter Anstieg der Austauschraten durch einen hohen CO₂-Preis ergeben wird, ist mit hohen Unsicherheiten verbunden. Die Austauschrate kann jedoch auch durch andere Instrumente wie Austauschpflichten (Verschärfung der bedingten Sanierungsanforderung) flankierend adressiert werden. Sofern der CO₂-Preis nicht zu höheren Austauschraten führt und sich damit lediglich auf die Wahl des Wärmeversorgungssystems auswirkt, sind Höhe und Geschwindigkeit der Steigerung des CO₂-Preises entscheidend. Entsprechend sind für die Zielerreichung ein schnellerer Anstieg des Preispfades sowie eine Veränderung der Austauschraten notwendig. Ein höherer CO₂-Preis in späteren Jahren erzielt hingegen nicht die gleichen Effekte, da die Investitionsentscheidungen

überwiegend bedarfsgetrieben sind (Ausfall, Instandsetzung) und entgangene Gelegenheiten zum Einbau von zielkonformer Wärmeversorgung und Sanierungsmaßnahmen in dem kurzen Zeitraum zwischen 2027 und 2030 nicht aufgeholt werden können.

Eine Grunderkenntnis der Analyse ist, dass die reine Berücksichtigung eines CO₂-Preises nur zu vergleichsweise geringen Einspareffekten führt, sofern eine Voraussicht der zu erwartenden CO₂-Preise und damit eine langfristige Planbarkeit nicht gegeben ist bzw. sofern bestehende Investitionsgüter bis zum Ende ihrer Lebensdauer genutzt werden. Sofern den Akteurinnen und Akteuren der CO₂-Preis vorab bekannt ist, so werden größere Einsparungen erzielt als ohne Planbarkeit in Bezug auf die Entwicklung des CO₂-Preises. Die größten Minderungen werden erzielt, sofern der Zeithorizont, für den mit einem erwartbaren CO₂-Preis gerechnet werden kann, ausreichend lang ist in Bezug auf die Lebensdauer des jeweiligen Investitionsguts. So ist im Verkehrssektor eine Planbarkeit über wenige Jahre (in der Analyse 5 Jahre) aufgrund der vergleichsweise kurzen Haltedauer ausreichend, während im Gebäude- und Industriesektor deutlich größere Einsparungen erzielt werden können, sofern die Planbarkeit sich über einen größeren Zeitraum (in der Analyse 20 Jahre) erstreckt.

Eine weitere zentrale Erkenntnis ist, dass deutlich größere Einsparungen erzielt werden können, sofern ein Austausch des Investitionsguts vor dem Ende der jeweiligen Lebensdauer erfolgt. Aufgrund der langfristigen Kapitalstöcke sind hierbei die Effekte im Gebäude- und Industriesektor am größten, während im Verkehrssektor aufgrund der vergleichsweise kurzen Haltedauern von Fahrzeugen der Zusatzeffekt durch einen vorzeitigen Austausch begrenzt ist.

Hierbei muss jedoch berücksichtigt werden, dass entschlossene Preissignale eine Voraussetzung dafür sind, dass eine verbesserte Planbarkeit (Foresight) und eine Veränderung der Austauschraten ihre Wirkung entfalten können: nur wenn fossile Investitionsgüter wirtschaftlich unattraktiv sind, wird durch die Austauschratenerhöhung die gewünschte Wirkung erzielt. Die Voraussicht (Foresight) und Austauschratenerhöhung können hierbei wiederum eine Reaktion von Akteurinnen und Akteuren auf Preissignale sein. Sie können aber auch durch andere Instrumente beeinflusst werden, wie Verbesserung von Informationsverfügbarkeit, Ordnungsrecht oder finanzielle Förderungen. Besondere Bedeutung ist dabei einem verlässlich kommunizierten Preispfad des BEHG zuzumessen. Eine entsprechende Kommunikation des (zu erwartenden) Preispfades ist insbesondere deshalb wichtig, da in allen untersuchten Sensitivitäten von Preissprüngen ausgegangen wird, die die Investitionsentscheidung beeinflussen können. Je später der entsprechende Preissprung auf die Investition erfolgt, desto mehr ist davon auszugehen, dass diese bei der Kaufentscheidung nicht berücksichtigt werden, sofern keine Informationen hierzu kommuniziert werden. Des Weiteren kann eine rechtzeitige Kommunikation künftig sprunghaft steigender Preise auch dazu führen, dass Investitionsgüter vorzeitig ausgetauscht werden. Zur Verbesserung der Maßnahmenbewertung sollte die Wirkung von Preissignalen auf Investitionsentscheidungen und damit verbunden den Austauschraten von Anlagen gezielt untersucht werden, insbesondere im Hinblick auf zu gewinnende empirische Erkenntnisse.

Die Analyse zeigt, dass nur in sechs der zehn CO₂-Preissensitivitäten die alte BEHG-Höchstmenge eingehalten wird. Die alten ESR-Emissionsziele werden wiederum lediglich in zwei Sensitivitäten eingehalten. Dies liegt daran, dass die ESR weitere Emissionen wie die Emissionen aus der Landwirtschaft, Abfallwirtschaft oder diffusen Quellen umfasst, die vom BEHG nicht adressiert werden. Das im Rahmen der aktuellen Beratungen zum Fit-for-55-Paket der EU zu erwartende verschärfte, neue ESR-Ziel wie auch die daraus abgeleitete neue BEHG-Höchstmenge wird in keiner CO₂-Preissensitivität eingehalten. Daraus kann geschlossen werden, dass zur Einhaltung der ambitionierteren BEHG-Ziele höhere CO₂-Preise als hier analysiert zu erwarten sind bzw. darüberhinausgehende klimapolitische Instrumente erforderlich sind. Zur Einhaltung der

ESR-Zielvorgaben sind gleichermaßen zusätzliche Instrumente in den nicht vom BEHG adressierten Bereichen notwendig.

Die Analyse isolierter CO₂-Preisänderungen im BEHG zeigt außerdem, dass die verstärkte Nutzung von Strom und Fernwärme in den Sektoren Industrie, Gebäude und Verkehr zu erheblich höheren Emissionen in der Energiewirtschaft führt. Die zusätzlichen Emissionen in der Energiewirtschaft können bis zur Hälfte der in den Sektoren Industrie, Gebäude und Verkehr eingesparten Emissionen ausmachen. Um die Klimaschutzziele in der Energiewirtschaft zu erreichen, sind aus diesem Grund ebenfalls zusätzliche Maßnahmen notwendig.

Insgesamt weisen die Rechnungen in diesem Gutachten darauf hin, dass der alleinige Fokus auf das Instrument der CO₂-Bepreisung durch das BEHG selbst bei den hier untersuchten, sehr hohen, CO₂-Preisen nicht dazu führt, die Ziele des KSG und der ESR einzuhalten. Damit sind über die bereits bestehende Klimaschutzmaßnahmen und -instrumente (u.a. Klimaschutzprogramm 2030) hinaus zusätzliche klimapolitische Anstrengungen erforderlich.

Mit Blick auf den geplanten Übergang vom Festpreissystem zu einem System fluktuierender, sich am Markt bildender, Zertifikatspreise zeigen die Modellierungen, dass Planungssicherheit ein wesentlicher Faktor für die Höhe der zu erwartenden Treibhausgasminderungen durch das BEHG ist. Findet die CO₂-Bepreisung in einem als stabil wahrgenommenen regulatorischen Rahmen statt, sodass von Investoren und Marktteilnehmern ein stabiler und steigender CO₂-Preispfad erwartet wird, erhöht dies die Lenkungswirkung der CO₂-Bepreisung erheblich. Neben einer nachvollziehbar und gut kommuniziert festgelegten Emissionsobergrenze können dabei auch Mindestpreise oder andere Elemente zur Stärkung der Planungssicherheit eine Rolle spielen. Erfolgt die Minderung der Treibhausgasemissionen wiederum ausschließlich über den Preismechanismus, so ist von stark steigenden Zertifikatspreisen nach Ablauf der Festpreisphase auszugehen.

Damit bestätigt sich mit dieser Modellierungsarbeit auch die wirtschaftstheoretische Herleitung (vgl. Kemfert et al. (2021)), dass zur Erreichung der Klimaschutzziele ein Politik-Mix zielführend ist, welcher die CO₂-Bepreisung mit ordnungsrechtlichen Instrumenten, Förderprogrammen und weiteren Instrumenten (z.B. dem Abbau klimaschädlicher Subventionen) kombiniert. Notwendig sind des Weiteren Infrastrukturmaßnahmen, die den Umstieg auf klimafreundliche Alternativen erleichtern bzw. ermöglichen, z.B. der Ausbau von Ladesäulen oder des öffentlichen Verkehrs. Dadurch kann die Wirksamkeit der preislichen Anreize durch das BEHG erhöht werden. Je stärker das BEHG durch andere Klimaschutzinstrumente flankiert wird und kontraproduktive Anreize (beispielsweise durch klimaschädliche Subventionen) entfallen, desto niedriger fällt der Zertifikatspreis aus, der für das Erreichen der Klimaschutzziele erforderlich ist.

Quellenverzeichnis

AGEB (2017): Energiebilanzen 2015. Online verfügbar unter <https://www.ag-energiebilanzen.de/7-0-Bilanzen-1990-2012.html>.

Agora Verkehrswende; Agora Energiewende; Frontier Economics (2018): Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe. Studie. Berlin.

Bäumer, Marcus; Hautzinger, Heinz; Pfeiffer, Manfred; Stock, Wilfried; Lenz, Barbara; Kuhnimhof, Tobias Georg; Köhler, Katja (2017): Fahrleistungserhebung 2014 - Inlandsfahrleistung und Unfallrisiko. Bremen (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Verkehrstechnik). Online verfügbar unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/opus45-bast/frontdoor/deliver/index/docId/1775/file/BAST_V_291_barrierefreies_Internet_PDF.pdf, zuletzt geprüft am 08.07.2021.

DBFZ (2018): Monitoring Biokraftstoffsektor. Online verfügbar unter https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Referenzen/DBFZ_Reports/DBFZ_Report_11_4.pdf, zuletzt geprüft am 03.11.2020.

EC (2020): Amended proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulation (EU) 2018/1999 (European Climate Law). 2020/0036 (COD), zuletzt geprüft am 10.05.2021.

European Commission (EC) (2021): Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. 'Fit for 55': delivering the EU's 2030 Climate Target on the way to climate neutrality. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/chapeau_communication.pdf, zuletzt geprüft am 16.08.2021.

Fleiter, Tobias; Rehfeldt, Matthias; Herbst, Andrea; Elstrand, Rainer; Klingler, Anna-Lena; Manz, Pia; Eidelloth, Stefan (2018): A methodology for bottom-up modelling of energy transitions in the industry sector. The FORECAST model. In: *Energy Strategy Reviews* (22), S. 237–254. DOI: 10.1016/j.esr.2018.09.005.

Fraunhofer ISI; IREES; TEP (2021): FORECAST. FOREcasting Energy Consumption Analysis and Simulation Tool. Methodology. Online verfügbar unter <https://www.forecast-model.eu/forecast-en/content/methodology.php>.

Harthan; Ralph O.; Repenning, Julia; Blanck, Ruth; Böttcher, Hannes; Bürger, Veit et al. (2020): Abschätzung der Treibhausgasminderungswirkung des Klimaschutzprogramms 2030 der Bundesregierung. Teilbericht des Projektes „THG-Projektion: Weiterentwicklung der Methoden und Umsetzung der EU-Effort Sharing Decision im Projektionsbericht 2019 („Politikszenerarien IX“)“. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Öko-Institut; Fraunhofer Institut für System und Innovationsforschung (ISI); Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien (IREES). Dessau-Roßlau (Climate Change, 33/2020). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/abschaetzung-der-treibhausgasminderungswirkung-des>, zuletzt geprüft am 19.11.2021.

Hobohm, Jens; Maur, Alex auf der; Dambeck, Hans; Kemmler, Andreas; Koziel, Sylvie; Kreidelmeyer, Sven et al. (2018): Status und Perspektiven flüssiger Energieträger in der Energiewende. Studie im Auftrag von Mineralölwirtschaftsverband e.V. (MWW), Institut für Wärme und Oeltechnik e.V. (IWO), MEW Mittelständische Energiewirtschaft Deutschland e.V. und UNITI Bundesverband mittelständischer Mineralölunternehmen e. V. Prognos; Fraunhofer Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik (Fraunhofer UMSICHT); Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ). Berlin. Online verfügbar unter https://www.prognos.com/uploads/tx_at-wpubdb/Prognos-Endbericht_Fluessige_Energietraeger_Web-final.pdf, zuletzt geprüft am 11.06.2018.

Jacobsen, Mark R.; van Benthem, Arthur A. (2015): Vehicle Scrappage and Gasoline Policy. In: *American Economic Review* 105 (3), S. 1312–1338. DOI: 10.1257/aer.20130935.

Kemfert, Claudia; Evert, Janik; Holzmann, Sara; Priem, Maximilian (2021): Grenzen einer CO₂-Bepreisung. Dekarbonisierungsmaßnahmen jenseits eines CO₂-Preises. Eine Studie für Greenpeace Deutschland. Hg. v. Greenpeace. Online verfügbar unter <https://diw-econ.de/wp-content/uploads/GP-Die-Grenzen-eines-CO2-Preises.pdf>, zuletzt geprüft am 07.04.2022.

Kranzl, Lukas; Hummel, Marcus; Müller, Andreas; Steinbach, Jan (2013): Renewable heating: perspectives and the impact of policy instruments. In: *Energy Policy* 59, S. 44–58.

Müller, Andreas (2015): Energy Demand Assessment for Space Conditioning and Domestic Hot Water: A Case Study for the Austrian Building Stock. Technische Universität Wien.

Rehfeldt, Matthias; Globisch, Joachim; Fleiter, Tobias (2019): Fuel choice in industrial steam generation: Empirical evidence reveals technology preferences. In: *Energy Strategy Reviews* (26). DOI: 10.1016/j.esr.2019.100407.

Steinbach, Jan (2015): Modellbasierte Untersuchung von Politikinstrumenten zur Förderung erneuerbarer Energien und Energieeffizienz im Gebäudebereich. Stuttgart: Fraunhofer Verlag. Online verfügbar unter <https://www.verlag.fraunhofer.de/bookshop/buch/Modellbasierte-Untersuchung-von-Politikinstrumenten-zur-Förderung-erneuerbarer-Energien-und-Energieeffizienz-im-Gebäudebereich/245046>.

UBA (2020): Methodenkonvention 3.1 zur Ermittlung von Umweltkosten. Kostensätze. Stand 12/2020. Unter Mitarbeit von Astrid Matthey, Büniger und Björn. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/methodenkonvention-umweltkosten>, zuletzt geprüft am 17.08.2021.

Wermuth, Manfred; Neef, Christian; Wirth, Rainer; Hanitz, Inga; Löhner, Holger; Hautzinger, Heinz et al. (2012): Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010 (KiD 2010). Schlussbericht.