

CLIMATE CHANGE

60/2024

Teilbericht

Analyse von Backstop- Technologien unter steigenden CO₂-Preisen im Gebäude- und Verkehrssektor

von:

Sibylle Braungardt, Katharina Göckeler, Peter Kasten
Öko-Institut e.V., Freiburg/Berlin

Herausgeber:

Umweltbundesamt

CLIMATE CHANGE 60/2024

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

Forschungskennzahl 3719 41 107 0
FB001728

Teilbericht

Analyse von Backstop-Technologien unter steigenden CO₂-Preisen im Gebäude- und Verkehrssektor

von

Sibylle Braungardt, Katharina Göckeler, Peter Kasten
Öko-Institut e.V., Freiburg/Berlin

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

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

Durchführung der Studie:

Öko-Institut e.V.
Merzhauser Straße 173
79100 Freiburg

Abschlussdatum:

Oktober 2024

Redaktion:

Fachgebiet V3.3 Ökonomische Grundsatzfragen des Emissionshandels, Auktionierung,
Auswertungen
Fabian Schmid, Hans Zschüttig

Publikationen als pdf:

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

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, Dezember 2024

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

Kurzbeschreibung: Analyse von Backstop-Technologien unter steigenden CO₂-Preisen im Gebäude- und Verkehrssektor

Die Studie untersucht für verschiedene Fallbeispiele aus dem Gebäude- und Verkehrssektor, ab welchen CO₂-Preisen emissionsmindernde Technologien aus betriebswirtschaftlicher Perspektive Kostenparität gegenüber fossilen Alternativen erreichen. Für einen Großteil der betrachteten Technologien ergibt sich eine Bandbreite von notwendigen CO₂-Preisen zwischen Null und etwa 300 Euro pro Tonne CO₂. Die Berechnungen zeigen, dass die CO₂-Bepreisung einen wesentlichen Beitrag leisten kann, die Wirtschaftlichkeit der Technologien zu verbessern. In beiden Sektoren wirken sich allerdings auch eine Reihe anderer Instrumente und Rahmenbedingungen auf die Verbreitung der Technologien aus.

Abstract: Analysis of backstop technologies under rising CO₂ prices in the buildings and transportation sectors

The study examines various case studies from the building and transportation sectors and discusses under which CO₂ prices different technologies for reducing greenhouse gas emissions become economically viable from a microeconomic perspective. For the technologies considered, there is a range of necessary CO₂ prices between zero and about 300 Euro per ton of CO₂. The calculations show that CO₂ pricing can contribute significantly to improving the economic viability of the technologies. However, in both sectors, a number of other instruments and framework conditions also affect the diffusion of the technologies.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildungsverzeichnis..... | 7 |
| Tabellenverzeichnis..... | 7 |
| Abkürzungsverzeichnis..... | 8 |
| 1 Zusammenfassung und Hintergrund..... | 9 |
| 2 Fallbeispiele im Gebäudesektor..... | 12 |
| 2.1 Fallbeispiel Wärmepumpe..... | 12 |
| 2.1.1 Betriebskosten..... | 13 |
| 2.1.2 Gesamtkosten Wärmepumpe..... | 15 |
| 2.2 Fallbeispiel energetische Sanierung..... | 18 |
| 3 Fallbeispiele im Verkehrssektor..... | 20 |
| 3.1 Fallbeispiel Batterieelektrischer Lkw und E-Fuels..... | 20 |
| 3.1.1 Weitere Politikinstrumente mit direkter oder indirekter CO ₂ -Preiskomponente..... | 20 |
| 3.1.2 Gesamtnutzungskosten..... | 21 |
| 3.1.3 Einordnung der Bedeutung des CO ₂ -Preises für die Kaufentscheidung und im Kontext weiterer Politikinstrumente..... | 25 |
| 3.2 Fallbeispiel Batterieelektrischer Pkw und E-Fuels..... | 27 |
| 3.2.1 Gesamtnutzungskosten..... | 27 |
| 3.2.2 Einordnung der Bedeutung des CO ₂ -Preises für die Kaufentscheidung und im Kontext weiterer Politikinstrumente..... | 31 |
| 4 Diskussion und Schlussfolgerungen..... | 32 |
| 5 Quellenverzeichnis..... | 34 |
| A Anhang 1: Methodik zur Berechnung der Kosten im Gebäudebereich..... | 36 |
| A.1 Quellenverzeichnis Anhang..... | 37 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|---------------|--|----|
| Abbildung 1: | Notwendiger CO ₂ -Preis für Wirtschaftlichkeit im Betrieb – Standardstromtarif | 14 |
| Abbildung 2: | Notwendiger CO ₂ -Preis für Wirtschaftlichkeit im Betrieb – Wärmepumpenstromtarif | 15 |
| Abbildung 3: | Notwendiger CO ₂ -Preis für Kostenparität zwischen Wärmepumpe (WP) und Gaskessel – Fallbeispiele Einfamilienhaus mit Wärmepumpenstromtarif (mit und ohne Förderung)..... | 16 |
| Abbildung 4: | Notwendiger CO ₂ -Preis für Kostenparität zwischen Wärmepumpe (WP) und Gaskessel – Fallbeispiele Mehrfamilienhaus mit Wärmepumpenstromtarif (mit und ohne Förderung) | 17 |
| Abbildung 5: | Notwendiger CO ₂ -Preis für Kostenparität zwischen Sanierung und unterlassener Sanierung – Fallbeispiele Sanierung Einfamilienhaus mit Gaskessel EFH auf EH85 (mit und ohne Förderung)..... | 18 |
| Abbildung 6: | Kostenparität zwischen Sanierung und unterlassener Sanierung – Fallbeispiele Sanierung Mehrfamilienhaus mit Gaskessel MFH auf EH85 (mit und ohne Förderung)..... | 19 |
| Abbildung 7: | Gesamtnutzungskosten der Lkw-Antriebstechnologien inklusive der CO ₂ -Preise aus BEHG und Lkw-Maut | 23 |
| Abbildung 8: | Gesamtnutzungskosten (TCO) und notwendiger CO ₂ -Preis (BEHG/EU-ETS 2 + Maut) für Wirtschaftlichkeit von Batterie-Lkw gegenüber der Nutzung von fossilen Dieselmotoren..... | 24 |
| Abbildung 9: | Gesamtnutzungskosten (TCO) und notwendiger CO ₂ -Preis (BEHG/EU-ETS 2 + Maut) für Wirtschaftlichkeit der Nutzung von strombasierten Dieselmotoren (PtL) in Lkw gegenüber fossilen Quellen | 25 |
| Abbildung 10: | Gesamtnutzungskosten (TCO) der Pkw-Antriebstechnologien inklusive des CO ₂ -Preises aus dem BEHG im Jahr 2025 | 29 |
| Abbildung 11: | Gesamtnutzungskosten (TCO) und notwendiger CO ₂ -Preis für Wirtschaftlichkeit von Batterie-Pkw und vollständig mit E-Fuels betankten Benzin-Pkw gegenüber der Nutzung von fossilen Benzin-Kraftstoffen..... | 30 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|------------|--|----|
| Tabelle 1: | Notwendige CO ₂ -Preise für die Wirtschaftlichkeit ausgewählter Klimaschutztechniken im Gebäude- und Verkehrssektor | 11 |
| Tabelle 2: | Parametrisierung der Typgebäude | 12 |
| Tabelle 3: | Grundlagen für die Berechnungen der Fallbeispiele im Gebäudesektor | 37 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|-----------------------|--|
| BEHG | Brennstoffemissionshandelsgesetz |
| BEV | Batterie-Lkw |
| CO₂ | Kohlenstoffdioxid |
| EFH | Einfamilienhaus |
| E-Fuel | Electrofuel (strombasierte synthetische Kraftstoffe) |
| ETS | Emissions Trading System (Emissionshandelssystem) |
| EU | Europäische Union |
| EU-ETS 1 | Europäisches Emissionshandelssystem 1 für stationäre Anlagen, Luftverkehr und Seeverkehr |
| EU-ETS 2 | Europäisches Emissionshandelssystem 2 für den Gebäude- und den Straßenverkehrssektor sowie für andere Sektoren |
| GEG | Gebäudeenergiegesetz |
| ICEV | Diesel-Lkw |
| JAZ | Jahresarbeitszahl |
| Lkw | Lastkraftwagen |
| MFH | Mehrfamilienhaus |
| nEHS | nationales Emissionshandelssystem |
| Pkw | Personenkraftwagen |
| PtL | Power to Liquid (strombasierte Herstellung von Flüssigkraftstoff) |
| TCO | Total cost of ownership (Gesamtnutzungskosten) |
| THG | Treibhausgas |
| UBA | Umweltbundesamt |

1 Zusammenfassung und Hintergrund

Seit dem 1. Januar 2021 besteht in Deutschland mit dem Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG)¹ eine CO₂-Bepreisung, die vor allem auf die Brennstoffe im Gebäude- und Verkehrssektor wirkt. Das BEHG verpflichtet seit 2021 Inverkehrbringer von fossilen Kraft- und Brennstoffen, die am nationalen Emissionshandel (nEHS) teilnehmen, zum Erwerb von Emissionszertifikaten. Diese erhöhen den Preis für Kraft- und Brennstoffe um einen in den ersten Jahren festgelegten CO₂-Preis, der sich ab 2026 im Rahmen eines Preiskorridors bilden soll. Aktuell liegt der CO₂-Preis im Jahr 2024 bei 45 Euro/t CO₂. Im Projektionsbericht 2024 des Umweltbundesamtes (Harthan et al. 2024) wird für das Jahr 2030 ein CO₂-Preis in Höhe von 125 Euro/t CO₂ angenommen.

2027 wird der nEHS in den neuen Europäischen Emissionshandel für die Sektoren Gebäude und Verkehr und zusätzliche Sektoren (EU-ETS 2)² überführt (Schrems et al. 2023). Dieser erweitert den bestehenden Europäischen Emissionshandel (EU-ETS 1), der bislang große Energie- und Industrieanlagen sowie den Luft- und Seeverkehr in der EU erfasst. Die Preisbildung der Emissionszertifikate für Brenn- und Kraftstoffe soll nach dem Vorbild des EU-ETS 1 vollständig am Markt erfolgen. Im Gegensatz zum nEHS wird der EU-ETS 2 direkt mit einer festen Emissionshöchstgrenze (Cap) starten. Die Preise bilden sich damit als Knappheitspreise und sind insbesondere von der Ausgestaltung des Instrumenten-Mix im Gebäude- und Verkehrsbereich abhängig. Aktuelle Analysen zeigen, dass das Cap im EU-ETS 2 im Lichte des aktuellen Instrumenten-Mix ambitioniert ausgestaltet ist (Graichen und Ludig 2024). Daher sind gegenüber dem nEHS deutlich steigende CO₂-Preise möglich und erwartbar.

Die CO₂-Bepreisung im Verkehrs- und Gebäudesektor soll dazu beitragen, die Treibhausgasemissionen in den beiden Sektoren zu senken, und damit einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung der Energie- und Klimaziele auf nationaler und EU-Ebene leisten. Auf nationaler Ebene wurden in den letzten Jahren die Ziele aus dem Bundesklimaschutzgesetz in beiden Sektoren verfehlt und die Reduktionen der Treibhausgasemissionen bleiben hinter dem notwendigen Zielpfad hin zur Treibhausgasneutralität 2045 zurück.

Der Umfang der möglichen Treibhausgasemissionsminderungen durch eine CO₂-Bepreisung für den Verkehrs- und Gebäudesektor ist abhängig von den Entscheidungen, die Eigentümer*innen und Nutzer*innen von Gebäuden und Fahrzeugen im Kontext der Preisveränderungen treffen. Dabei spielen zwei Effekte eine Rolle:

1. Kurzfristig können Minderungen erzielt werden, indem das Verhalten angepasst wird, z.B. die Raumtemperatur gesenkt wird oder auf Fahrten mit dem Auto verzichtet wird.
2. Mittel- bis langfristig können durch investive Maßnahmen Minderungen erzielt werden, beispielsweise durch energetische Sanierungen bzw. die Anschaffung eines batterieelektrischen PKW.

Die vorliegende Studie untersucht für verschiedene relevante Fallbeispiele aus dem Gebäude- und Verkehrssektor, ab welchen CO₂-Preisen emissionsmindernde Technologien wirtschaftlich werden (betriebswirtschaftliche Perspektive). Dabei ist zu beachten, dass die Wirtschaftlichkeit der Technologien auch von anderen Faktoren wie der Energiepreisentwicklung und dem Förderrahmen abhängig ist. In Kapitel 2 werden zunächst Fallbeispiele aus dem Gebäudesektor betrachtet, die den Einbau von Wärmepumpen (Kapitel 2.1) sowie energetische Sanierungen

¹ Brennstoffemissionshandelsgesetz vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2728), das zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 9. November 2022 (BGBl. I S. 2006) geändert worden ist

² Richtlinie (EU) 2023/959

(Kapitel 2.2) in verschiedenen Gebäudetypen betrachten. In Kapitel 3 folgt die Betrachtung von Fallbeispielen im Verkehrssektor, wobei batterieelektrische LKW (Kapitel 3.1) und PKW (Kapitel 3.2) betrachtet werden. Kapitel 4 schließt mit einer sektorübergreifenden Diskussion und Schlussfolgerungen.

Die Studie zeigt, dass unter den getroffenen Annahmen der Einbau einer Wärmepumpe in den untersuchten Fallbeispielen ohne staatliche Förderung ab CO₂-Preisen zwischen 130 und 285 Euro/t CO₂ wirtschaftlich ist. In der fossilen Variante wird der Betrieb eines Gaskessels mit Betriebskosten von 10 Cent/kWh und im Fall der Wärmepumpe mit einer Jahresarbeitszahl (JAZ) von 2,5 bzw. 3 (je nach Szenario) 28 Cent/kWh angenommen. Die Wirtschaftlichkeit einer energetischen Sanierung ist unter den getroffenen Annahmen in einem typisierten Mehrfamilienhaus bereits ohne CO₂-Preis und Förderung gegeben. Im Falle des Einfamilienhauses ist hingegen ein CO₂-Preis von 175 Euro/t CO₂ für die Wirtschaftlichkeit der Sanierung notwendig. Die Berücksichtigung einer Investitionsförderung führt zu einer signifikanten Senkung des notwendigen CO₂-Preises. Somit ergibt sich im Gebäudesektor für die untersuchten Techniken und je nach Annahmen eine Kostenparität bei CO₂-Preisen ab einem niedrigen dreistelligen Bereich.

Im Verkehrsbereich wird die Umstellung von Diesel-Lkw bzw. Benzin-Pkw auf batterieelektrischen sowie auf Basis von synthetischen Kraftstoffen erfolgenden Betrieb untersucht. Mit der derzeitigen Ausgestaltung der Lkw-Maut in Deutschland (CO₂-Kostenkomponente von 200 Euro/t CO₂) und einem Diesel-Preis von 1,50 Euro/Liter ist im Jahr 2030 bei einem Strompreis von 30 ct/kWh in bestimmten Anwendungsfällen und unter den getroffenen Annahmen ein relevanter Kostenvorteil für batterieelektrische Lkw bereits ohne zusätzlichen CO₂-Preis gegeben. Im Fall von häufiger Ladung an eher teuren Ladepunkten und bei kurzen Fahrtstrecken stellt sich zukünftig jedoch erst durch den CO₂-Preis des BEHG bzw. des EU-ETS 2 ein Kostenvorteil für batterieelektrische Lkw ein – hier sind kombinierte CO₂-Preisniveaus aus Maut und BEHG bzw. EU-ETS 2 von 300 bis 400 Euro/t CO₂ erforderlich. Außer für den Fall günstiger strombasierter Dieselmotoren (unter 2,50 Euro/Liter) sind für die Wirtschaftlichkeit dieser Technik kombinierte CO₂-Preise von über 300 Euro/t CO₂ notwendig.

Batterieelektrische Pkw sind bei einer durchschnittlichen Jahresfahrleistung, einem Benzinpreis von 1,80 Euro/Liter und einem Strompreis von 36 Cent/kWh unter den getroffenen Annahmen bereits ohne CO₂-Preis ökonomisch vorteilhaft. Im Falle höherer Strompreise in Kombination mit niedrigen Fahrleistungen sind jedoch notwendige CO₂-Preisniveaus im niedrigen dreistelligen Bereich von über 100 Euro/t CO₂ für die Erreichung der Kostenparität notwendig. Für die wirtschaftliche Nutzung synthetischer Kraftstoffe werden dagegen bereits ab einem Preis von 3,00 Euro/Liter für diese synthetischen Kraftstoffe CO₂-Preise von über 400 Euro/t CO₂ benötigt.

Tabelle 1: Notwendige CO₂-Preise für die Wirtschaftlichkeit ausgewählter Klimaschutztechniken im Gebäude- und Verkehrssektor

| Gebäudesektor | |
|-------------------------------|-------------------------------|
| Einbau einer Wärmepumpe | 130 – 285 €/t CO ₂ |
| Energetische Sanierung | 0 - 175 €/t CO ₂ |
| Verkehrssektor | |
| Batterieelektrischer Lkw | 200 - 300 €/t CO ₂ |
| Lkw mit strombasiertem Diesel | 300 - 400 €/t CO ₂ |
| Batterieelektrischer Pkw | 0 €/t CO ₂ |
| Pkw mit E-Fuels | > 400 €/t CO ₂ |

Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 1 zeigt zusammenfassend, dass die hier betrachteten fossilfreien Heiz- und Antriebstechniken in den meisten Fällen signifikante CO₂-Preisniveaus zum Erreichen der Wirtschaftlichkeit benötigen, die damit ab 2027 (Einführung des EU-ETS 2) realistisch werden, um das Cap im EU-ETS 2 abzusichern. Wie die Höhe des zur Herstellung von Kostenparität notwendigen CO₂-Preises und damit die effektive Belastung der Betroffenen letztendlich ausfallen wird, hängt unter anderem von der Ausgestaltung der komplementierenden Förderinstrumente, der Verwendung der Einnahmen aus der CO₂-Bepreisung, den Wirkungshemmnissen des CO₂-Preises sowie der tatsächlichen Entwicklung der Energie- und Beschaffungskosten der Klimaschutztechniken ab.

Die zur Absicherung der Klimaziele notwendigen technologischen Umstiege im Gebäude- und Verkehrsbereich („Backstop-Technologien“) lassen sich damit in der Breite nur durch CO₂-Preise anreizen, die deutlich oberhalb des aktuellen Niveaus im BEHG liegen. Zur Steigerung der effektiven Wirkung des CO₂-Preises sollte dieser aber sinnvoll in einen Mix aus klimapolitischen und sektorspezifischen Instrumenten eingebettet sein. Dieser Mix muss insbesondere auf den Abbau der Wirkungshemmnisse ausgerichtet sein.

2 Fallbeispiele im Gebäudesektor

Für den Gebäudesektor werden vier Fallbeispiele betrachtet:

1. Der Einbau einer Wärmepumpe in einem Einfamilienhaus (EFH)
2. Der Einbau einer Wärmepumpe in einem Mehrfamilienhaus (MFH)
3. Die Sanierung auf den Effizienzstandard EH 85 in einem Einfamilienhaus
4. Die Sanierung auf den Effizienzstandard EH 85 in einem Mehrfamilienhaus

Die energetischen Kennwerte und Sanierungskosten werden für die in Tabelle 2 dargestellten Typgebäude abgeschätzt.

Tabelle 2: Parametrisierung der Typgebäude

| | Einfamilienhaus | Mehrfamilienhaus |
|--|--------------------|----------------------|
| Anzahl Wohneinheiten | 1 | 6 |
| Wohnfläche | 110 m ² | 426 m ² |
| Baujahr/Baualtersklasse | 1958-1968 | 1969-1978 |
| beheiztes Gebäudevolumen | 503 m ³ | 1.435 m ³ |
| Verhältnis zwischen Hüllfläche A und Gebäudeinhalt V | 0,92 | 0,59 |

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis Loga et al. (2015)

Der bauliche Ausgangszustand wird so gewählt, dass die Gebäude in die GEG-Effizienzklassen F fallen. Für den Einbau der Wärmepumpe wird zudem mit jeweils dem gleichen Typgebäude mit Sanierungsstand auf EH 85 gerechnet.

2.1 Fallbeispiel Wärmepumpe

Das vorliegende Fallbeispiel betrachtet den Einbau einer Wärmepumpe im Vergleich zur Installation eines Gaskessels. Die eingebaute Technik ist eine Luft-Wasser-Wärmepumpe, für die Effizienz des Geräts wird eine Bandbreite an typischen JAZ in Bestandsgebäuden zwischen 2,5 und 3 betrachtet. Die JAZ ist eine wichtige Größe für die Beschreibung der Effizienz von Wärmepumpen. Sie gibt das Verhältnis von zugeführter Energie (Strom) zu erzeugter Energie (abgegebener Wärme) an. Die JAZ hängt neben der Effizienz des Geräts (Norm-Leistungszahl) von den Gegebenheiten im Gebäude ab. Insbesondere spielt die Vorlauftemperatur des Heizungssystems eine wichtige Rolle: Bei niedrigen Vorlauftemperaturen ist der Betrieb der Wärmepumpe effizienter als bei hohen Vorlauftemperaturen. Diese hängt wiederum von der Art der Heizungsanlage ab, sodass beispielsweise bei Fußbodenheizungen in der Regel niedrigere Vorlauftemperaturen notwendig sind und die Effizienz somit höher ist.

Ziel dieses Abschnitts ist die Einordnung, ab welchen CO₂-Preisen die Installation einer Wärmepumpe wirtschaftlich ist. Die Wirtschaftlichkeit ist ein wichtiger Faktor für die Verbreitung von Wärmepumpen. Aufgrund der Vielzahl an nicht-ökonomischen Hemmnissen ist die Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu fossilen Techniken aber keine hinreichende Bedingung für die Verbreitung.

Für die Einordnung der Höhe des CO₂-Preises werden zunächst die Betriebskosten der Wärmepumpe im Vergleich zu einem Gaskessel betrachtet (Abschnitt 2.1.1). Im Anschluss werden die Gesamtkosten inklusive der Investition betrachtet, wobei zwischen dem Fallbeispiel

eines Einfamilienhauses (Abschnitt 2.1.2) und eines Mehrfamilienhauses (Abschnitt 2.1.3) unterschieden wird.

2.1.1 Betriebskosten

Die Betriebskosten der Wärmepumpe hängen wesentlich von zwei Faktoren ab: 1) von der Effizienz der Anlage und 2) von der Entwicklung der Endverbraucherpreise für Gas und Strom.

Obgleich die Effizienz von Wärmepumpen im Vergleich zum Gaskessel um etwa einen Faktor 3 höher ist, besteht ein Kostenvorteil im Betrieb der Wärmepumpe nur dann, wenn die Strompreise die Gaspreise um weniger als diesen Faktor übersteigen.

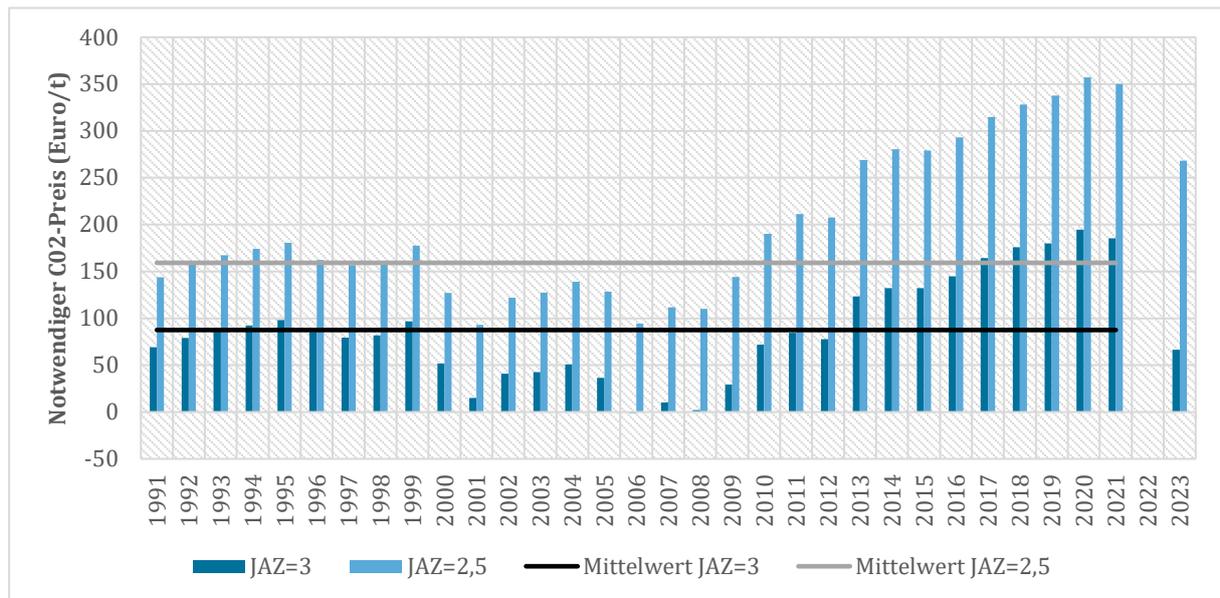
Im ersten Schritt wird zunächst rückblickend in einer hypothetischen Perspektive die Entwicklung der Strom- und Gaspreise seit dem Jahr 1991 dahingehend bewertet, welcher CO₂-Preis nötig gewesen wäre, um den wirtschaftlichen Betrieb einer Wärmepumpe sicherzustellen. In diesem Abschnitt wird dabei zunächst nur auf den Betrieb der Anlage fokussiert, die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung unter Einbezug der Investitionskosten erfolgt im nachfolgenden Abschnitt. Dabei wird ein Standard-Stromtarif für Haushaltsstrom zu Grunde gelegt, nachfolgend werden Wärmepumpen-Tarife berücksichtigt.

Abbildung 1 zeigt die jeweils notwendigen CO₂-Preise für eine Wärmepumpe mit JAZ 3 (gute Effizienz) und 2,5 (mäßige Effizienz) im Standardstromtarif. Die beiden Werte wurden gewählt, um eine Bandbreite der real gemessenen JAZ in Bestandsgebäuden abzudecken³. Bis zum Jahr 2021 werden statistische Daten verwendet, für das Jahr 2023 werden die Obergrenzen aus der Gas- bzw. Strompreisbremse genutzt.

Die Abbildung macht deutlich, dass die Wirtschaftlichkeit in Abhängigkeit von den relevanten Preisentwicklungen starken Schwankungen unterworfen war. Insbesondere bedingt durch sehr günstige Gaspreise wäre für effiziente Wärmepumpen mit einer JAZ von drei ein wirtschaftlicher Betrieb zwischen 2013 und 2021 erst mit CO₂-Preisen in der Größenordnung ab 100 bis 200 Euro/t CO₂ möglich gewesen (dunkelblaue Balken). Im Mittel über den gesamten betrachteten Zeitraum ergibt sich für diesen Fall ein Wert von 88 Euro/t CO₂. Für Wärmepumpen mit JAZ 2,5 (die gerade in schlechteren Gebäuden durchaus vorkommen) wären zwischen 2013 und 2021 hingegen CO₂-Preise in der Größenordnung von 200 bis 350 Euro/t CO₂ notwendig gewesen (hellblaue Balken). Im Mittel über den gesamten betrachteten Zeitraum ergibt sich hier ein Wert von knapp 160 Euro/t CO₂. Mit den für das Jahr 2023 angesetzten Werten der Energiepreisbremsen⁴ sinkt dieser Wert deutlich. Im Zeitraum vor 2013 wurden die jeweiligen Wirtschaftlichkeitsschwellen bereits bei Preisniveaus von 50 bis 100 Euro/t CO₂ bzw. 100 bis 200 Euro/t CO₂ erreicht. Im Jahr 2006 wäre der Betrieb effizienter Wärmepumpen sogar ohne CO₂-Preis wirtschaftlich gewesen.

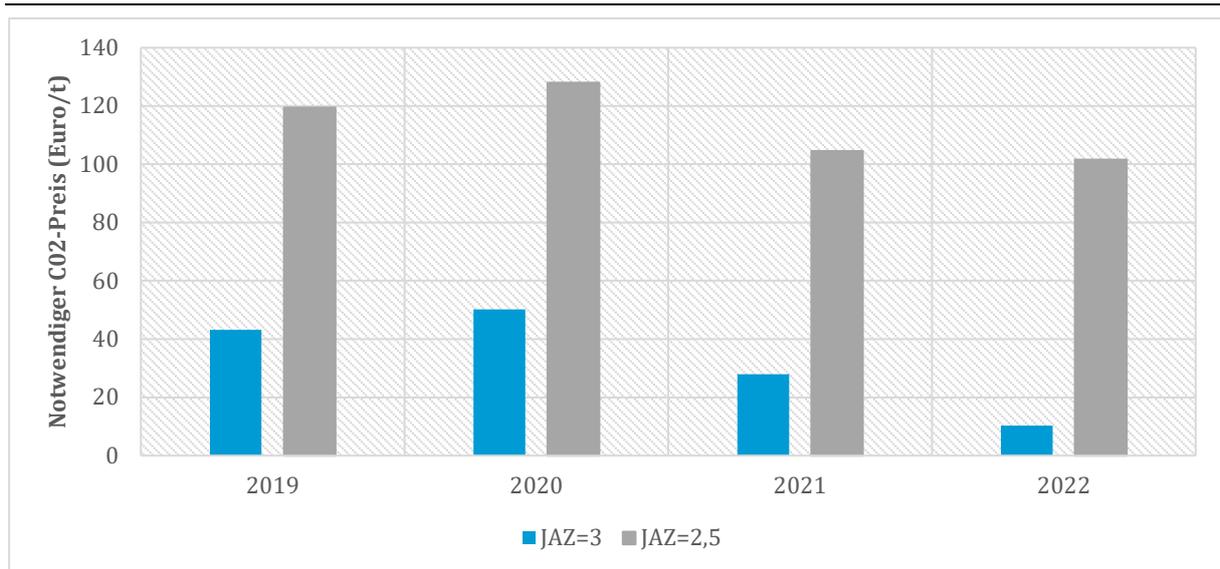
³ Für eine Beschreibung der Feldtests und der gemessenen Jahresarbeitszahlen siehe Miara 2021.

⁴ Fragen und Antworten zu den Energiepreisen (Breg - Bundesregierung 2024)

Abbildung 1: Notwendiger CO₂-Preis für Wirtschaftlichkeit im Betrieb – Standardstromtarif

Quelle: Öko-Institut

Das Bild verändert sich, wenn spezifische Wärmepumpen-Tarife zu Grunde gelegt werden, in denen der Strombezug günstiger als der Standardtarif ist (Abbildung 2). Insgesamt wurden im Jahr 2023 laut (Bundesnetzagentur (BNetzA 2023)) 750.000 Wärmepumpen mit einem Wärmepumpentarif betrieben. Bei einem Gesamtbestand an Wärmepumpen von etwa 1,8 Mio. sind dies etwas mehr als 40%. Die niedrigeren Kosten für Wärmepumpenstrom sind insbesondere auf reduzierte Netznutzungsentgelte für steuerbare Lasten zurückzuführen. Grundlage für diese Reduzierung ist § 14a Energiewirtschaftsgesetz. Die folgende Abbildung 2 zeigt für den Zeitraum 2019 bis 2022, dass sich in diesem Fall die notwendigen CO₂-Preise im Fall effizienter Wärmepumpen auf weniger als 50 Euro/t CO₂ reduzieren, im Falle von Wärmepumpen mit ineffizientem Betrieb sind allerdings weiterhin CO₂-Preise in der Größenordnung von 100 bis 130 Euro/t CO₂ notwendig. Das Preisverhältnis von Wärmepumpenstromtarifen und dem Standardtarif ist für die Jahre 2019 bis 2022 dem Monitoringbericht der Bundesnetzagentur des jeweiligen Jahres entnommen.

Abbildung 2: Notwendiger CO₂-Preis für Wirtschaftlichkeit im Betrieb – Wärmepumpenstromtarif

Quelle: Öko-Institut

Aus dem Vergleich der Energiekosten einer Wärmepumpe mit denen eines Gaskessels können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- ▶ Mit den Energiepreisen der vergangenen Jahre ergeben sich gerade in den letzten zehn Jahren notwendige CO₂-Preise, die deutlich höher sind als der derzeit bis 2026 festgelegte Preispfad im BEHG. Dies trifft insbesondere für Wärmepumpen mit geringer Effizienz zu. Dies ist insbesondere deshalb der Fall, da sich die hier dargestellten Werte auf die reinen Betriebskosten beziehen und die deutlich höheren Investitionskosten für Wärmepumpen nicht berücksichtigen.
- ▶ Die Reduktion der Stromkosten – auch durch Wärmepumpentarife – spielt eine zentrale Rolle und spielt neben der CO₂-Bepreisung eine wichtige Rolle für den wirtschaftlichen Betrieb von Wärmepumpen.
- ▶ Die Effizienz der Wärmepumpen im Betrieb ist ein wichtiger Faktor für die Wirtschaftlichkeit. Die JAZ wird einerseits durch die Effizienz des Geräts selbst und andererseits durch die Einbausituation (insbesondere Vorlauftemperatur des Heizungssystems) bestimmt. Wie in den Berechnungen gezeigt wurde, sind Wärmepumpen mit einer JAZ von 3 auch schon bei deutlich niedrigeren CO₂-Preisen im Betrieb wirtschaftlich. Eine Feldstudie des Fraunhofer ISE analysierte Juli 2018 bis Juni 2019 29 Außenluft-Wärmepumpen zur Raumheizung und Trinkwassererwärmung. Die Anlagen erreichten eine JAZ von 2,5 bis 3,8. Der Mittelwert lag bei 3,1 (Fraunhofer ISE 27.07.2020).

2.1.2 Gesamtkosten Wärmepumpe

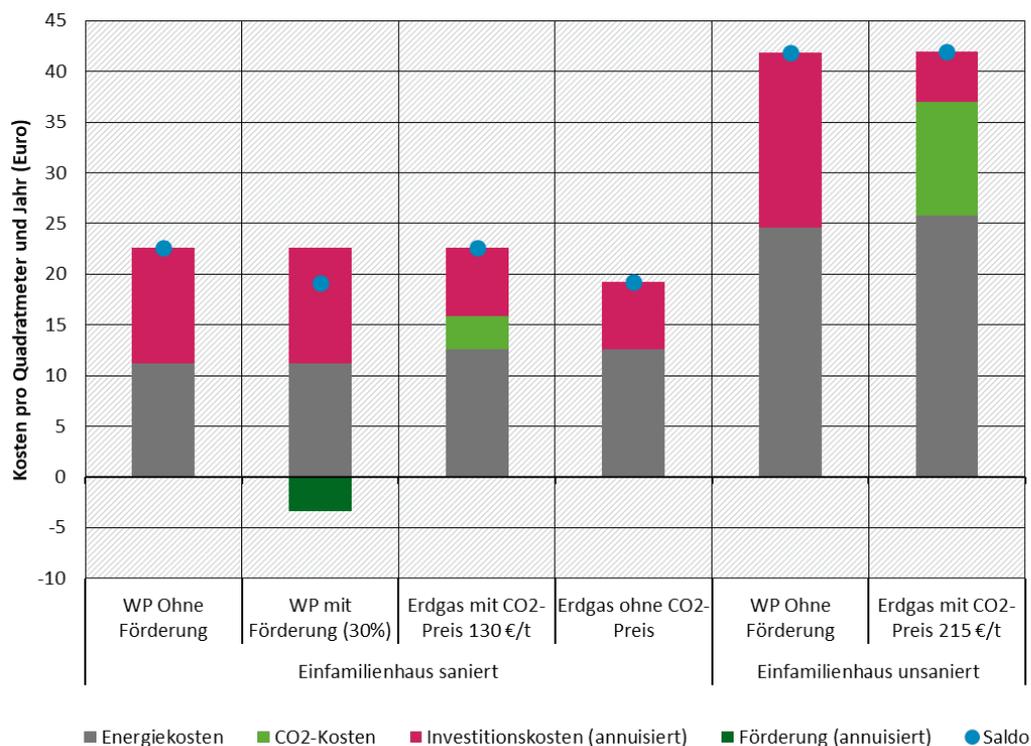
Für die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit von Wärmepumpen müssen auch die Gesamtkosten unter Berücksichtigung der Investition in die Technik betrachtet werden. In der folgenden Betrachtung wird die Wärmepumpe im Vergleich zum Gaskessel als wirtschaftlich betrachtet, wenn die Gesamtkosten über die Lebensdauer den Kosten der Referenzinvestition in den Gaskessel entsprechen. Dabei wurde der Einbau einer Wärmepumpe mit dem eines Gaskessels verglichen (Vollkosten über die Lebensdauer). Für die Preise für Gas und Strom wird mit einem durchschnittlichen Preis über die Lebensdauer (20 Jahre) der Anlage von 10 Cent/kWh für Gas

(Preis ohne CO₂-Komponente) und 28 Cent/kWh für Wärmepumpenstrom gerechnet. Das methodische Vorgehen sowie die Inputparameter sind im Anhang beschrieben. Es wird jeweils unterschieden zwischen zwei Fallsituationen: 1) Einbau der Wärmepumpe in das unsanierte Gebäude, hier wird mit einer JAZ von 2,5 gerechnet. 2) Einbau der Wärmepumpe in das auf EH85 sanierte Gebäude, dabei wird mit einer JAZ von 3 gerechnet.

Im Falle der Wärmepumpe mit einer Jahresarbeitszahl von 3 wird eine Variante mit Förderung und eine Variante ohne Förderung berechnet. Für die Förderung wird der in der Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG) als Grundförderung angesetzte Fördersatz von 30 % gewählt. Im Falle der Wärmepumpe mit einer Jahresarbeitszahl von 2,5 ist keine Förderung möglich, da in der BEG ein Mindestwert von 3,0 erreicht werden muss.

Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse für das Fallbeispiel des Einbaus einer Wärmepumpe im unsanierten bzw. sanierten Einfamilienhaus (JAZ 2,5 bzw. 3). Dargestellt sind die Gesamtkosten und die Kostenkomponenten pro Quadratmeter und Jahr der verschiedenen Varianten über den Lebenszyklus. Ohne die Berücksichtigung einer Investitionsförderung ist die Wärmepumpe im Falle des sanierten Einfamilienhauses ab einem CO₂-Preis von 130 Euro/t CO₂ wirtschaftlich (linkes und drittes Szenario von links in Abbildung 3). Die CO₂-Kosten würden in diesem Fall mit etwa 3 Euro pro Quadratmeter und Jahr etwa 20 % der Heizkosten verursachen. Unter Berücksichtigung von Förderung (30 % Grundförderung) wäre die Wirtschaftlichkeit bereits ohne CO₂-Preis gegeben (zweites und viertes Szenario von links in Abbildung 3). Für den Fall des unsanierten Einfamilienhauses ergibt sich für das Fallbeispiel ein notwendiger CO₂-Preis von 215 Euro/t CO₂. Die CO₂-Kosten würden in diesem Fall mit 11 Euro pro Quadratmeter und Jahr etwa 30 % der Heizkosten verursachen.

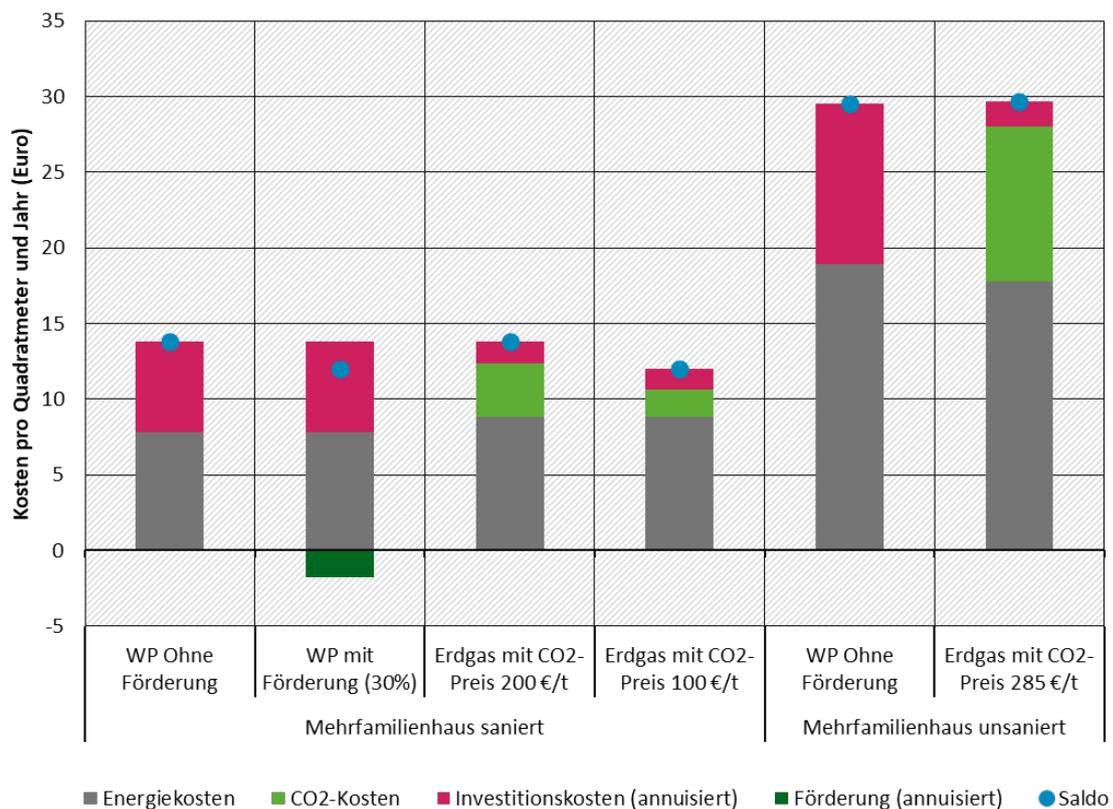
Abbildung 3: Notwendiger CO₂-Preis für Kostenparität zwischen Wärmepumpe (WP) und Gaskessel – Fallbeispiele Einfamilienhaus mit Wärmepumpenstromtarif (mit und ohne Förderung)



Quelle: Öko-Institut

Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse für das Fallbeispiel des Einbaus einer Wärmepumpe im Mehrfamilienhaus. Ohne die Berücksichtigung einer Investitionsförderung ist die Wärmepumpe im sanierten Mehrfamilienhaus ab einem CO₂-Preis von 200 Euro/t CO₂ wirtschaftlich. Die CO₂-Kosten würden in diesem Fall mit 3,50 Euro pro Quadratmeter und Jahr 30 Prozent der Heizkosten verursachen. Unter Berücksichtigung der Förderung wäre die Wirtschaftlichkeit bereits ab einem CO₂-Preis von 100 Euro/t CO₂ realisiert. Im unsanierten Fall ergibt sich für das betrachtete Beispielgebäude ein CO₂-Preis von 285 Euro/t CO₂. Die CO₂-Kosten würden hier mit 10 Euro pro Quadratmeter und Jahr 36 % der Heizkosten verursachen.

Abbildung 4: Notwendiger CO₂-Preis für Kostenparität zwischen Wärmepumpe (WP) und Gaskessel – Fallbeispiele Mehrfamilienhaus mit Wärmepumpenstromtarif (mit und ohne Förderung)



Quelle: Öko-Institut

Aus dem Vergleich der Gesamtkosten zwischen einer Wärmepumpe und einem Gaskessel lassen sich mehrere wichtige Erkenntnisse ableiten. Erstens kann der CO₂-Preis die Wirtschaftlichkeit der Wärmepumpe je nach Höhe des Preises im Vergleich zum Gaskessel erhöhen. Damit dieser Aspekt jedoch effektiv in Investitionsentscheidungen einfließt, muss er von den wirtschaftlichen Akteuren als Kostenfaktor realisiert werden und zum Zeitpunkt der Investitionsentscheidung in seiner Höhe abschätzbar sein. Zweitens zeigen die Berechnungen, dass ohne die Berücksichtigung von Fördermitteln deutlich höhere CO₂-Preise erforderlich sind, um die Wärmepumpe wirtschaftlich attraktiver zu machen, als dies mit der Einbeziehung von Förderungen der Fall wäre. Drittens basieren diese Berechnungen auf einem spezifischen Wärmepumpenstromtarif von 28 Cent pro Kilowattstunde. Ohne diesen Tarif würden die erforderlichen CO₂-Preise zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit der Wärmepumpe signifikant steigen. Schließlich gibt es Unterschiede in der Wirtschaftlichkeit zwischen

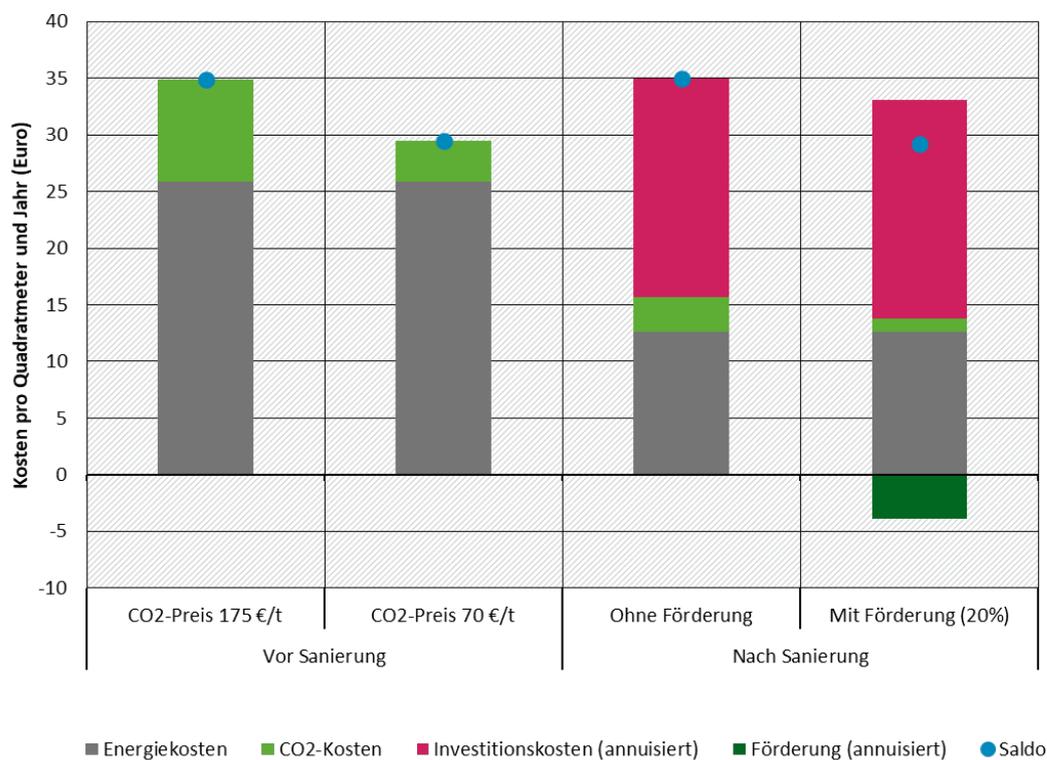
Mehrfamilienhäusern und Einfamilienhäusern, die hauptsächlich darauf zurückzuführen sind, dass bei Gaskesseln die Investitionskosten mit zunehmender Leistung nur geringfügig steigen, während bei Wärmepumpen die Investitionskosten mit zunehmender Leistung deutlich ansteigen.

2.2 Fallbeispiel energetische Sanierung

Für die Betrachtung der Kosten für energetische Sanierungen wird die Sanierung auf ein Effizienzniveau EH85 für ein mit Gas beheiztes Einfamilienhaus sowie für ein mit Gas beheiztes Mehrfamilienhaus betrachtet.

Für die Sanierung eines (im Ausgangszustand unsanierten) Einfamilienhauses zeigt Abbildung 5, dass die energetischen Mehrkosten für die Sanierung ohne Förderung ab einem CO₂-Preis von 175 Euro/t wirtschaftlich sind (linkes Szenario und zweites Szenario von links in Abbildung 5), mit Berücksichtigung einer Förderung von 20 Prozent⁵ bereits mit einem CO₂-Preis von 70 Euro/t (zweites und viertes Szenario von links in Abbildung 5).

Abbildung 5: Notwendiger CO₂-Preis für Kostenparität zwischen Sanierung und unterlassener Sanierung – Fallbeispiele Sanierung Einfamilienhaus mit Gaskessel EFH auf EH85 (mit und ohne Förderung)

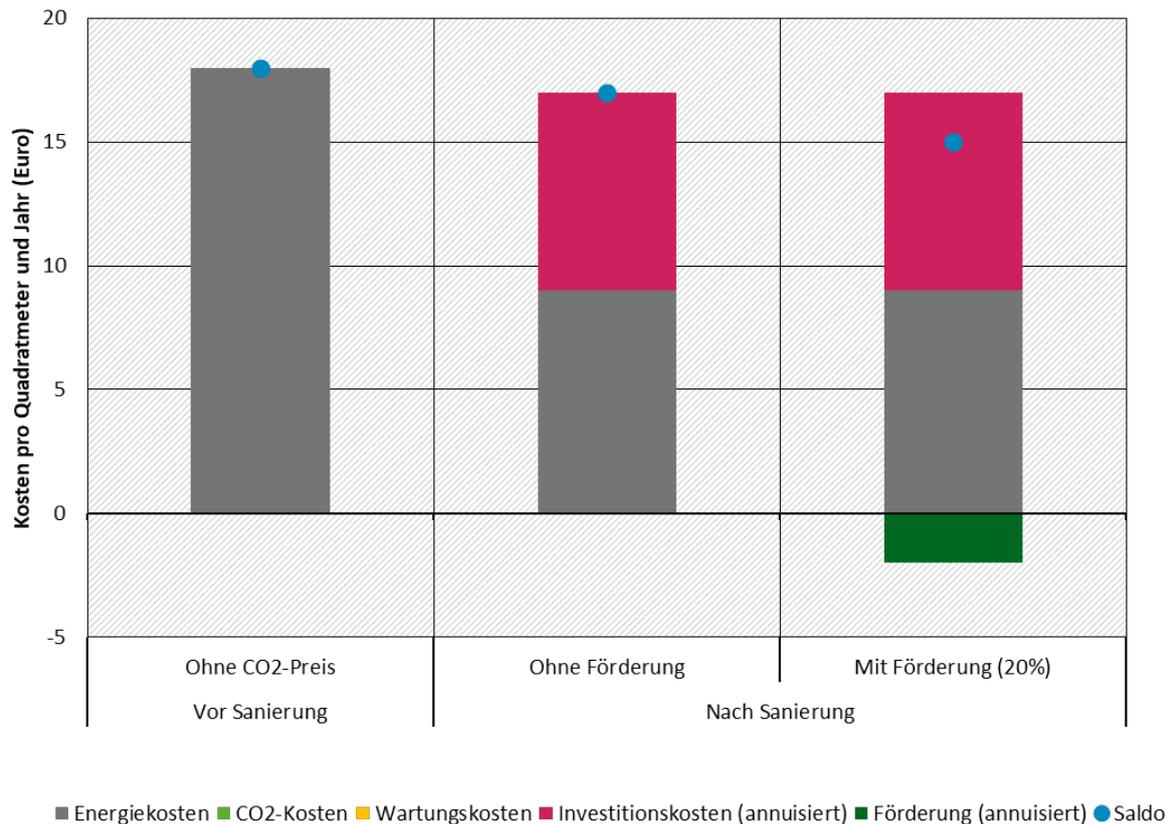


Quelle: Öko-Institut

Für die Sanierung eines (im Ausgangszustand unsanierten) Mehrfamilienhauses zeigt Abbildung 6, dass die energetischen Mehrkosten für die Sanierung bereits ohne Förderung wirtschaftlich sind.

⁵ Die Tilgungszuschuss für Sanierungen auf Effizienzhaus 85 Erneuerbare-Energien-Klasse oder Nachhaltigkeits-Klasse beträgt derzeit 10 %. Des Weiteren besteht für so genannte „worst-performing-buildings“ ein zusätzlicher Bonus von 10 %.

Abbildung 6: Kostenparität zwischen Sanierung und unterlassener Sanierung – Fallbeispiele Sanierung Mehrfamilienhaus mit Gaskessel MFH auf EH85 (mit und ohne Förderung)



Quelle: Öko-Institut

Aus den Berechnungen zum Fallbeispiel der energetischen Sanierung lassen sich wichtige Schlussfolgerungen ziehen, die für die Entscheidungsfindung in Bezug auf Investitionen in energetische Sanierungen wichtig sind. Zunächst zeigt sich, dass der CO₂-Preis eine wichtige Rolle bei der Verbesserung der Wirtschaftlichkeit solcher Sanierungsmaßnahmen spielt. Um diesen Effekt in Investitionsentscheidungen angemessen zu berücksichtigen, muss der CO₂-Preis von Beginn an einbezogen werden. Des Weiteren ergibt sich aus den Berechnungen, dass für das hier betrachtete Fallbeispiel eines Mehrfamilienhauses die Wirtschaftlichkeit energetischer Sanierungen unter der Annahme eines durchschnittlichen Gaspreises von 10 Cent pro Kilowattstunde auch ohne CO₂-Bepreisung und Investitionsförderungen gegeben ist. Für Einfamilienhäuser stellt sich diese Wirtschaftlichkeit jedoch nur unter Berücksichtigung von Förderungen und der CO₂-Bepreisung ein. Sollten die Gaspreise unter 10 Cent pro Kilowattstunde fallen, würde dies im Vergleich zu den hier vorgestellten Berechnungen die Wirtschaftlichkeit verringern, würde also höhere CO₂-Preise oder Fördersätze erfordern. Die Unterschiede zwischen Mehrfamilienhäusern und Einfamilienhäusern sind vor allem auf die geringeren spezifischen energetischen Mehrkosten bei Mehrfamilienhäusern zurückzuführen. Diese Unterschiede unterstreichen die Notwendigkeit einer differenzierten Betrachtung verschiedener Gebäudetypen bei der Planung energetischer Sanierungsmaßnahmen.

3 Fallbeispiele im Verkehrssektor

3.1 Fallbeispiel Batterieelektrischer Lkw und E-Fuels

Seit dem Beschluss der EU zu CO₂-Flottenzielwerten für schwere Nutzfahrzeuge⁶ ist für Lkw in den letzten Jahren ein Trend hin zu emissionsfreien Antriebstechnologien zu erkennen, wie er für Pkw bereits etabliert ist (siehe Abschnitt 3.2). Verschiedene emissionsfreie Antriebstechnologien bringen verschiedene Vor- und Nachteile mit sich. Batterieelektrische Lkw sind jedoch derzeit die von der Industrie am stärksten verfolgte und bei den Neuzulassungen die bisher am stärksten verbreitete emissionsfreie Alternative zum Diesel-Lkw (NOW 2023). Aus diesem Grund findet in diesem Fallbeispiel ein Vergleich zwischen batterieelektrischen und verbrennungsmotorischen Last- und Sattelzugmaschinen statt. Ebenso wird die Nutzung von strombasierten Kraftstoffen in konventionellen Dieselmotoren betrachtet. Zur Einordnung der Höhe des CO₂-Preises führen wir an dieser Stelle einen Vergleich der Gesamtnutzungskosten (siehe Abschnitt 3.1.2) durch, da diese eine relevante Größe in der Entscheidungsfindung zwischen verschiedenen Antriebsoptionen beim Fahrzeugwerb sind. Eine Betrachtung der Betriebskosten alleine findet nicht statt, da die Haltedauer der Fahrzeuge normalerweise eher im Bereich weniger Jahre liegt. Somit ist eine Reaktion auf veränderte CO₂-Preise innerhalb weniger Jahre über einen Antriebswechsel in vielen Fällen möglich.

3.1.1 Weitere Politikinstrumente mit direkter oder indirekter CO₂-Preiskomponente

Im Straßengüterverkehr gelten neben dem CO₂-Preis des BEHG bzw. des künftigen EU-ETS 2 und der CO₂-basierten Lkw-Maut weitere Instrumente zur Begünstigung von im Betrieb CO₂-freien Antriebstechnologien. So ist die THG-Quote ein weiteres ordnungsrechtliches Instrument, welches ähnlich wie das BEHG bzw. EU-ETS 2 Emissionsminderungsvorgaben für Treibhausgase (THG) macht und sich somit u.a. ein Markt für den Einsatz von erneuerbaren Kraftstoffen bildet. Hierzu im Einzelnen:

- ▶ Ende 2023 wurde eine Novelle der **Lkw-Maut**⁷ beschlossen. Hintergrund ist eine neue Fassung der EU-Richtlinie 2022/362 (die sogenannte „Eurovignette“-Richtlinie), welche die Mitgliedstaaten zu einer Differenzierung der Maut nach CO₂-Emissionsklassen verpflichtet, sofern sie bereits Mautgebühren auf europäischen Verkehrswegen erheben. Eine komplette Befreiung von den Mautgebühren wie bisher ist ab dem Jahr 2026 daher nicht mehr möglich. Entsprechend hat die Bundesregierung die Befreiung von der Lkw-Maut ab Dezember 2023 für elektrische Fahrzeuge durch eine Ermäßigung in Höhe von 75 % auf die Infrastrukturkomponente der Lkw-Maut abgelöst. Zudem wurde neben den Luftschadstoff- und Lärmkomponenten eine CO₂-Komponente in Höhe von 200 Euro/t CO₂ eingeführt – eine Verrechnung mit BEHG bzw. EU-ETS 2 ist nicht vorgesehen. Diese Regelungen gelten für alle schweren Nutzfahrzeuge ab 3,5 Tonnen zulässigem Gesamtgewicht (bisher ab 7,5 Tonnen) mit Ausnahmen für Handwerksbetriebe.
- ▶ Die THG-Emissionsminderungsquote (in kurz: **THG-Quote**)⁸ ist die Umsetzung der Anforderungen der derzeit gültigen Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED II) für den Verkehrssektor. Die THG-Quote fordert von den Inverkehrbringern von Diesel- und Ottokraftstoffen für den landgebundenen Verkehr, dass sich die durchschnittlichen THG-Emissionen der in Verkehr gebrachten Energiemengen um einen gewissen Prozentsatz

⁶ (EU) 2019/1242

⁷ Drittes Gesetz zur Änderung mautrechtlicher Vorschriften (BGBl. 2023 I Nr. 315 vom 24.11.2023)

⁸ §§ 37a-g BImSchG

gegenüber dem fossilen Komparator von 94,1 g CO₂-Äq./MJ verringern. Die Bilanzierung findet dabei anders als im BEHG/EU-ETS 2, in dem „nur“ die direkten Emissionen der CO₂-Bepreisung unterliegen, in einer Well-to-Wheel-Logik statt und zieht die THG-Emissionen in der Vorkette der Nutzung mit ein.

Zur THG-Emissionsminderung zugelassen sind verschiedene Biokraftstofftypen, erneuerbare Kraftstoffe nicht-biologischen Ursprungs (RFNBO⁹), zu denen auch die E-Fuels zählen, als auch die THG-Emissionsminderung aus der Nutzung von Strom in Straßenfahrzeugen. Bei der Zielverfehlung müssen die Inverkehrbringer von Kraftstoffen eine Strafzahlung in Höhe von 600 Euro/t CO₂-Äq. entrichten. Die THG-Emissionsminderungsanforderung der THG-Quote steigt von 6 % im Jahr 2020 kontinuierlich auf 25 % im Jahr 2030 an. Für die verschiedenen zulässigen Optionen der THG-Emissionsminderung existieren teilweise unterschiedliche Anrechnungsmethoden (Multiplikatoren für bestimmte Energieträger), unterschiedliche zu nutzende Mindestmengen (z.B. für fortschrittliche Biokraftstoffe) und unterschiedliche maximal anrechenbare energetische Beimischquoten (z.B. für Biokraftstoffe aus Futter- und Nahrungsmitteln und aus Altspeiseölen und Tierfetten). Die THG-Quote wird auf Basis der Novellierung der Erneuerbare-Energie-Richtlinie¹⁰ in den nächsten Jahren überarbeitet.

Insgesamt besteht durch die Novelle der Lkw-Maut ein wirksames Preisinstrument, um die Nutzung von Lkw mit emissionsfreien Antrieben anzureizen. Der über die Lkw-Maut festgelegte CO₂-Preis in Höhe von 200 Euro/t CO₂ wird zusätzlich über den Zertifikatspreis im BEHG bzw. EU-ETS 2 signifikant steigen, sodass für das Jahr 2030 CO₂-Preise von in Summe 300 Euro/t CO₂ und mehr realistisch sind. Entsprechend der „Eurovignetten-Richtlinie“ kann die CO₂-Bepreisung über die Lkw-Maut jedoch auch entfallen, sobald geeignete weitere Instrumente den CO₂-Ausstoß mit einem hinreichend hohen Preis versehen.

Die THG-Quote führt bis zu der geforderten Menge an THG-Emissionsminderung dazu, dass Marktpreise für die verschiedenen zugelassenen THG-Emissionsminderungsoptionen entstehen, die über den Produktionskosten der Kraftstoffe liegen. Aufgrund der verschiedenen Marktsegmente für die Einhaltung der THG-Quote, die sich durch die verschiedenen Anrechnungsmethoden und Anrechnungsgrenzen bzw. -mindestanforderungen der verschiedenen Energieträger ergeben, stellen sich für die unterschiedlichen Typen an erneuerbaren Kraftstoffen auch unterschiedliche Marktpreise ein. Zu beachten ist dabei auch, dass Kraftstoffe einfach zu transportieren sind und sich somit ein globaler Markt für diese Kraftstoffe einstellt. Für das Marktsegment der E-Fuels lag der Marktpreis im Jahr 2021 bei über 400 Euro/t CO₂-Äq.; bis heute sind die Marktpreise jedoch gefallen und liegen derzeit bei nur noch über 100 Euro/t CO₂-Äq.¹¹. Das hohe Ambitionsniveau der THG-Quote spricht jedoch dafür, dass sich bis 2030 auch wieder höhere Marktpreise in der THG-Quote einstellen werden.

3.1.2 Gesamtnutzungskosten

Für die Neuanschaffung von Fahrzeugen sind im Straßengüterverkehr im Wesentlichen die Gesamtnutzungskosten (englisch: Total Cost of Ownership, TCO) ausschlaggebend. Voraussetzungen für die ökonomisch basierte Kaufentscheidung sind allerdings eine hohe Zuverlässigkeit des Fahrzeugmodells sowie eine zuverlässige Verfügbarkeit von Energieversorgungsinfrastrukturen, wie eine Befragung von Transportunternehmen aus dem

⁹ Renewable Fuels of Non-Biological Origin

¹⁰ (EU) 2023/2413

¹¹ Anhand der Entwicklung der THG-Quoten-Prämien für Fahrzeugbesitzern von batterieelektrischen Fahrzeugen, kann die Preisentwicklung abgeschätzt werden. (z.B. Verivox 2024 - Stand: 05.07.2024)

Frühjahr 2021 zeigt (Öko-Institut 2022). Abbildung 7 zeigt exemplarisch die jährlichen Gesamtnutzungskosten für einen Sattelzug, der mit einer Haltedauer von 5 Jahren und einer jährlichen Fahrleistung von 120.000 Kilometern typische Nutzungsdaten aufweist. Das Anschaffungsjahr ist mit dem Jahr 2030 auf einen Zeitraum gelegt, in dem sich der Markt für Elektro-Lkw bereits etabliert haben dürfte. Grundlage der Berechnungen bildet die Studie „StratES - Szenarien für die Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs“ (Öko-Institut 2023). Die Gesamtnutzungskosten setzen sich aus den folgenden wesentlichen Bestandteilen zusammen:

- ▶ Der aufgeführte **Anschaffungspreis** berücksichtigt neben dem Kaufpreis¹² des Fahrzeugs den Restwert nach der Haltedauer und eine Finanzierung mit einer Zinsrate von 5 %. Im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor (ICEV) verursacht vorrangig das Batteriesystem von batterieelektrischen Lkw (BEV) in Abhängigkeit von der Reichweite (hier: 400 km plus 15 % Restladung) deutliche Mehrkosten. Zusätzlich ist für BEV die Anschaffung eines Depotladepunktes¹³ in die Betrachtung einbezogen.
- ▶ Aufgrund der hohen Fahrleistungen weisen die **Energiekosten** den höchsten Kostenbeitrag auf. Batterieelektrische Lkw profitieren gegenüber Antrieben mit Diesel-Verbrennungsmotor von einem etwa um die Hälfte reduzierten Energieverbrauch. Die ökonomischen Vorteile hängen allerdings zusätzlich von den Energiepreisen an Tankstelle und Ladesäule ab. Für Batterie-Lkw bestimmt zudem die anteilige Nutzung von Depotladepunkten und voraussichtlich teureren öffentlichen Hochleistungs-Ladepunkten im Megawatt-Bereich den durchschnittlichen Strompreis. Die dargestellten Energiekosten basieren auf der Annahme eines mittleren Strompreises von 30 Cent/kWh sowie Dieselpreisen an der Tankstelle von 1,80 Euro/l für fossilen Kraftstoff und 2,50 Euro/l für strombasierten Kraftstoff. Diese Energiepreise enthalten Steuern, Abgaben, Umlagen und für den fossilen Kraftstoff den CO₂-Preis des BEHG¹⁴ bzw. EU-ETS 2. Die Mehrwertsteuer entfällt für die ausschließlich betrieblichen Kunden.
- ▶ Die **Wartungskosten** beinhalten Wartungs- und Reparaturkosten sowie Kosten für Schmierstoffe und Harnstofflösungen zur Abgasnachbehandlung (z.B. AdBlue). Durch Einsparungen insbesondere bei den letztgenannten Positionen sind die Wartungskosten für batterieelektrische Antriebe geringer.
- ▶ Unter den **sonstigen Unterhaltskosten** sind Versicherungskosten und zum Beispiel Kosten für die Unterbringung und das Fuhrparkmanagement aufgeführt. Durch den höheren Anschaffungspreis ist der Kaskoanteil der Versicherung von Batterie-Lkw höher als für konventionelle Diesel-Lkw.
- ▶ Die Ausgestaltung der **Lkw-Maut** wurde bereits im vorherigen Abschnitt beschrieben.

Abbildung 7 zeigt die Relevanz der Energiekosten für den Vergleich der Gesamtnutzungskosten zwischen den Antriebstechnologien. Unter den gesetzten Annahmen stellen batterieelektrische Antriebe (BEV400) mit gut 160.000 Euro pro Jahr eine deutlich kostengünstigere Dekarbonisierungsoption dar, als die Nutzung von strombasierten Kraftstoffen in konventionellen Dieselmotoren (ICEV (PtL)) mit fast 190.000 Euro pro Jahr. Nichtsdestotrotz benötigen Elektro-Lkw in der frühen Marktphase neben dem CO₂-Preis des BEHG bzw. des EU-ETS 2 den zusätzlichen starken ökonomischen Anreiz gegenüber fossilen Diesel-Lkw (ICEV

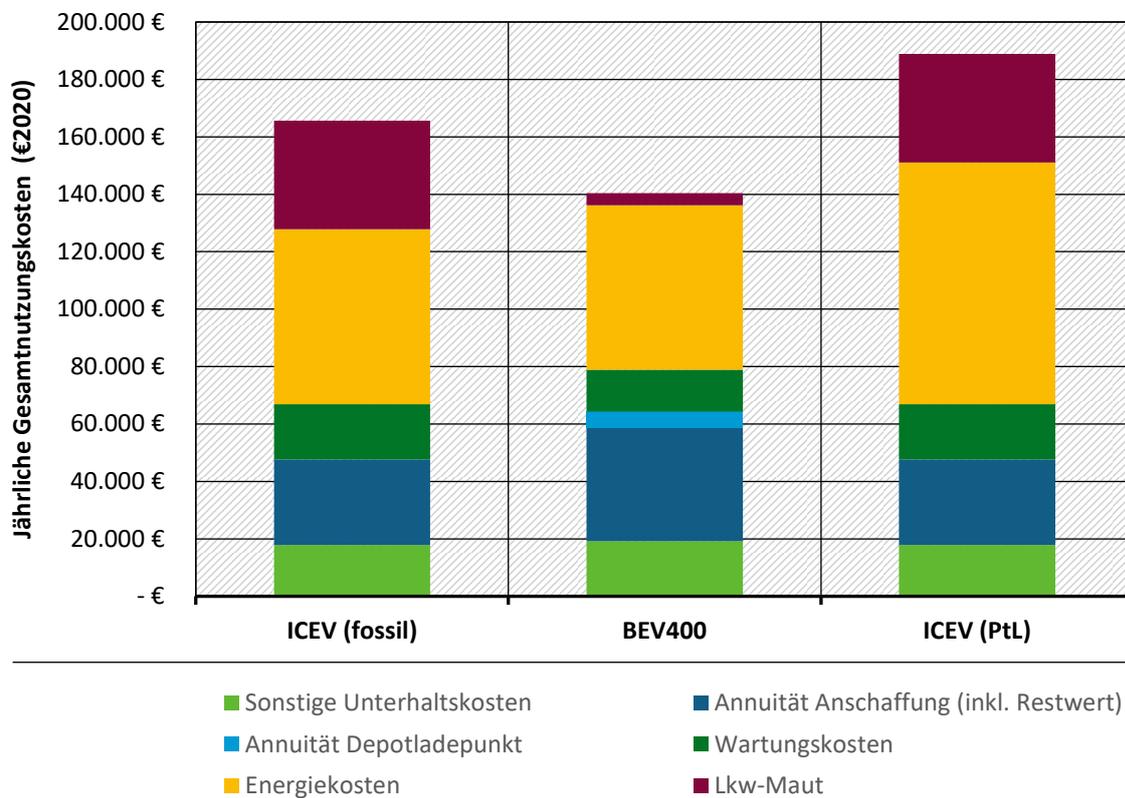
¹² In allen hier gezeigten Rechnungen beziehen wir uns auf die Anschaffungspreise von Lkw, die in der Studie „StratES - Szenarien für die Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs“ für das Jahr 2030 angenommen werden.

¹³ Der Depotladepunkt dient dazu, dass der Lkw an seinem Stellplatz im Depot des Logistikunternehmens geladen werden kann.

¹⁴ Annahme für CO₂-Preis: 125 Euro/t CO₂ im Jahr 2030. Dies entspricht etwa 0,30 Euro/l Diesel.

(fossil) über die CO₂-differenzierte Lkw-Maut bis eine Skalierung der Technologie die Anschaffungspreise reduziert und mehr Sicherheit über die zukünftige Preisgestaltung bzw. das Nutzungsverhalten von öffentlichen Hochleistungs-Ladepunkten besteht.

Abbildung 7: Gesamtnutzungskosten der Lkw-Antriebstechnologien¹⁵ inklusive der CO₂-Preise aus BEHG und Lkw-Maut



Quelle: Öko-Institut

Für eine Abschätzung des **notwendigen CO₂-Preises** – aus Kombination aus BEHG bzw. EU-ETS 2 und Lkw-Maut – stellt Abbildung 8 einen Vergleich der jährlichen Gesamtnutzungskosten (TCO) von konventionellen **Diesel-Lkw (ICEV)** und **Batterie-Lkw (BEV)** dar. Dabei werden zwei zentrale Parameter mit direktem Einfluss auf die Energiekosten variiert: die pro Jahr gefahrenen Kilometer und der Strompreis an der Ladesäule. Der aufgeführte Tankstellenpreis für fossilen Diesel in Höhe von 1,50 Euro/l enthält keinen CO₂-Preis und auch die Lkw-Maut mit der unterschiedlichen Belastung zwischen den Antriebssystemen wird in dieser Kostenbilanz bewusst nicht berücksichtigt.

Für Pkw werden an öffentlichen Ladesäulen zum Teil hohe Preise aufgerufen, die nach Anbieter, Ladeleistung und Kundenstatus (Adhoc oder Vertragskunde) variieren. Für Schnell-Ladepunkte liegen die Preise beim Ad-Hoc-Laden, d.h. ohne Vertragsbindung mit monatlichen Mitgliedsbeiträgen, aktuell bei etwa 50 bis 75 Cent/kWh (ADAC 2024). Welche Preise sich an öffentlichen Lkw-Ladesäulen etablieren, ist offen. Im Depot zahlen Transportunternehmen etwa 20 bis 25 Cent/kWh und Großkunden zum Beispiel im produzierenden Gewerbe lediglich etwa 15 Cent/kWh. Aufgrund dessen werden in Abbildung 8 neben der Jahresfahrleistung auch die Strompreise an der Ladesäule über eine breite Spanne variiert und die jeweiligen Mehrkosten

¹⁵ ICEV: Fahrzeug mit Verbrennungsmotor (englisch: Internal combustion engine vehicle), BEV: Batterieelektrisches Fahrzeug (englisch: Battery electric vehicle), PtL: Strombasierter Flüssigkraftstoff, sogenannte E-Fuels (englisch: Power-to-Liquid)

gegenüber einem Lkw unter Nutzung von fossilen Dieselkraftstoffen ausgewiesen (ohne CO₂-Preis des BEHG und Lkw-Maut). Zudem zeigt die Abbildung farblich hervorgehoben den zur Kompensation der Mehrkosten benötigten CO₂-Preis in fünf Preisstufen.

Laden Transportunternehmen überwiegend im Depot (25 Cent/kWh) und haben eine Jahresfahrleistung von 120.000 km sind die Gesamtnutzungskosten eines Batterie-Lkws um 9.223 Euro höher verglichen mit einem Diesel-Lkw, wenn keine CO₂-Preise (BEHG bzw. EU-ETS 2 und Lkw-Maut) wirken. In diesem Szenario sind für die Wirtschaftlichkeit des Batterie-Lkws CO₂-Preise unter 200 Euro/t CO₂ aus BEHG bzw. EU-ETS 2 und Lkw-Maut bereits im Jahr 2030 ausreichend, um vorteilhafte Gesamtnutzungskosten gegenüber konventionellen Diesel-Lkw zu erzielen. Für den im Beispiel oben verwendeten mittleren Strompreis von 30 Cent/kWh steigen die Gesamtnutzungskosten des Batterie-Lkw im Vergleich um über 8.000 Euro, sodass ein deutlich höherer CO₂-Preis von bis zu 300 Euro/t CO₂ benötigt wird, um für Jahresfahrleistungen ab 100.000 Kilometer Kostenparität bzw. Kostenvorteile für den batterieelektrischen Lkw zu erzielen. Hohe Strompreise ab 40 Cent/kWh, die vor allem anfallen können, wenn ein sehr großer Anteil des Ladens im öffentlichen Raum mit hohen Ladeleistungen stattfindet, machen CO₂-Preise von 400 Euro/t CO₂ und mehr erforderlich. Die Preisbildung an öffentlichen Ladepunkten sowie der Anteil des öffentlichen Ladens im Nutzungsprofil des jeweiligen Fahrzeugs wird demnach einen entscheidenden Einfluss auf den notwendigen CO₂-Preis haben, der erforderlich ist, um die Nutzung fossiler Dieselkraftstoffe zugunsten elektrischer Antriebe einzudämmen.

Abbildung 8: Gesamtnutzungskosten (TCO) und notwendiger CO₂-Preis (BEHG/EU-ETS 2 + Maut) für Wirtschaftlichkeit von Batterie-Lkw gegenüber der Nutzung von fossilen Dieselkraftstoffen

| ICEV (TCO pro Jahr) | | Jahresfahrleistung (km) | | | | |
|-------------------------------|------|-------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | 80.000 | 100.000 | 120.000 | 140.000 | 160.000 |
| Dieselpreis Tankstelle (€/l) | 1,5 | 94.141 € | 105.773 € | 117.404 € | 129.036 € | 140.668 € |
| BEV400 (Mehrkosten p. a.) | | Jahresfahrleistung (km) | | | | |
| | | 80.000 | 100.000 | 120.000 | 140.000 | 160.000 |
| Strompreis Ladesäule (ct/kWh) | 15,0 | -1.011 € | -5.443 € | -9.875 € | -14.306 € | -18.738 € |
| | 20,0 | 5.354 € | 2.514 € | -326 € | -3.166 € | -6.006 € |
| | 25,0 | 11.720 € | 10.471 € | 9.223 € | 7.974 € | 6.725 € |
| | 30,0 | 18.086 € | 18.429 € | 18.771 € | 19.114 € | 19.457 € |
| | 35,0 | 24.452 € | 26.386 € | 28.320 € | 30.254 € | 32.188 € |
| | 40,0 | 30.818 € | 34.343 € | 37.869 € | 41.394 € | 44.920 € |
| | 45,0 | 37.183 € | 42.300 € | 47.418 € | 52.535 € | 57.652 € |

Legende: Notwendiger CO₂-Preis zur Kompensation der Mehrkosten in €/tCO₂

| | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| < 100 | < 200 | < 300 | < 400 | > 400 |
|-------|-------|-------|-------|-------|

Quelle: Öko-Institut

Bei der **Nutzung von strombasierten Kraftstoffen** bleiben die Kostenbestandteile für das Fahrzeug, der Energieverbrauch, das Nutzungsverhalten sowie die Betankungs- und Transportinfrastrukturen der Kraftstoffe des verbrennungsmotorischen Fahrzeugs (ICEV) erhalten. Im Gegenzug ist die Herstellung von strombasierten Kraftstoffen energie- und kostenintensiv. In einer Überblicksstudie zeigt Agora Verkehrswende eine breite Preisspanne in den Prognosen. Im Mittel wird für das Jahr 2030 ein Produktionspreis von etwa 1,50 Euro/l angegeben, dem Herstellungskosten für fossile Kraftstoffe von 0,60 bis 0,70 Euro/l gegenüberstehen (Neuling und Berks 2023). Die Preise an den Tankstellen dürften inklusive Steuern, Umlagen und Margen deutlich höher liegen.

Abbildung 9 vergleicht die **Gesamtnutzungskosten für konventionelle Sattelzüge für die Nutzung von fossilen und strombasierten (PtL) Diesel-Kraftstoffen**. Dabei werden die Jahresfahrleistung der Fahrzeuge und der Tankstellenpreis für PtL variiert. Der niedrigste aufgeführte PtL-Preis von 1,75 Euro/l im Jahr 2030 ist eine sehr optimistische Annahme für die Preisentwicklung der PtL-Kraftstoffe. In diesem Fall beträgt bei einer Jahresfahrleistung von 120.000 km ohne CO₂-Preis der Kostenvorteil des Lkws mit fossilem Diesel 8.422 Euro vergleichen mit der Nutzung von strombasiertem Diesel. Demzufolge sind mit unter 100 Euro/t CO₂ zwar sehr niedrige CO₂-Preise notwendig, um die Kraftstoffe marktfähig zu machen, anders als bei den batterieelektrischen Lkw stellt sich wegen der höheren Kraftstoffkosten aber ohne CO₂-Preis nie eine Kostenreduktion ein. Die PtL-Nutzung ist immer mit höheren Kosten verbunden als die Nutzung fossilen Diesels, solange die Herstellungskosten des PtL über den Produktionskosten fossilen Diesels liegen. Bereits ab einem PtL-Preis von 2,25 Euro/l wird ein CO₂-Preis in Höhe von bis zu 300 Euro/t CO₂ benötigt, um die zusätzlichen Kraftstoffkosten auszugleichen. In dem Beispiel in Abbildung 7 mit einem angenommenen PtL-Preis von 2,50 Euro/l sind die Gesamtnutzungskosten des Lkws mit PtL-Nutzung für alle analysierten Jahresfahrleistungen über 20.000 Euro höher als bei der Nutzung von fossilem Diesel, sodass der erforderliche CO₂-Preis auf bis zu 400 Euro/t CO₂ steigt. Der vergleichsweise hohe Energieverbrauch in Verbrennungsmotoren verursacht eine hohe Preissensibilität, die im Bereich heute üblicher Schwankungen von Kraftstoffpreisen an Tankstellen zu Unterschieden im Preisausgleich der CO₂-Emissionen in Höhe von rund 100 Euro/t CO₂ führen.

Abbildung 9: Gesamtnutzungskosten (TCO) und notwendiger CO₂-Preis (BEHG/EU-ETS 2 + Maut) für Wirtschaftlichkeit der Nutzung von strombasierten Dieselkraftstoffen (PtL) in Lkw gegenüber fossilen Quellen

| ICEV (TCO pro Jahr) | | Jahresfahrleistung (km) | | | | |
|------------------------------|------|-------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | 80.000 | 100.000 | 120.000 | 140.000 | 160.000 |
| Dieselpreis Tankstelle (€/l) | 1,5 | 94.141 € | 105.773 € | 117.404 € | 129.036 € | 140.668 € |
| PtL-ICEV (Mehrkosten p. a.) | | Jahresfahrleistung (km) | | | | |
| | | 80.000 | 100.000 | 120.000 | 140.000 | 160.000 |
| PtL-Preis Tankstelle (€/l) | 1,75 | 5.614 € | 7.018 € | 8.422 € | 9.825 € | 11.229 € |
| | 2,00 | 11.229 € | 14.036 € | 16.843 € | 19.650 € | 22.457 € |
| | 2,25 | 16.843 € | 21.054 € | 25.265 € | 29.475 € | 33.686 € |
| | 2,50 | 22.457 € | 28.072 € | 33.686 € | 39.301 € | 44.915 € |
| | 2,75 | 28.072 € | 35.090 € | 42.108 € | 49.126 € | 56.144 € |
| | 3,00 | 33.686 € | 42.108 € | 50.529 € | 58.951 € | 67.372 € |
| | 3,25 | 39.301 € | 49.126 € | 58.951 € | 68.776 € | 78.601 € |

Legende: Notwendiger CO₂-Preis zur Kompensation der Mehrkosten in €/tCO₂

| | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| < 100 | < 200 | < 300 | < 400 | > 400 |
|-------|-------|-------|-------|-------|

Quelle: Öko-Institut

3.1.3 Einordnung der Bedeutung des CO₂-Preises für die Kaufentscheidung und im Kontext weiterer Politikinstrumente

Die Entscheidung für oder gegen bestimmte Antriebstechnologien treffen Transportunternehmen nicht allein auf Basis der Gesamtnutzungskosten eines Lkw. Die Gesamtnutzungskosten sind aber ein wichtiges Entscheidungsmerkmal beim Fahrzeugkauf und daher relevant für die gewählte Antriebstechnologie und damit einhergehenden Auswirkungen auf die THG-Emissionen im Verkehr. Abbildung 8 und Abbildung 9 weisen darauf hin, dass die CO₂-Bepreisung entscheidend dazu beitragen kann, emissionsfreie Technologien in den Markt zu bringen. Dabei sind batterieelektrische Lkw aller Voraussicht nach mit niedrigeren Kosten verbunden und zeigen tendenziell bei bereits niedrigeren CO₂-Preisen eine größere

Marktfähigkeit auf als vollständig mit E-Fuels betankte Lkw. Für den Lkw-Verkehr gilt es allerdings zu beachten, dass die CO₂-Bepreisung durch das BEHG bzw. den EU-ETS 2 nicht das einzige Instrument für Kauf- und Verhaltensentscheidungen ist.

Die Lkw-Maut beinhaltet seit Dezember 2023 eine eigene CO₂-Komponente in Höhe von 200 Euro/t CO₂. Zudem sind emissionsfreie Lkw, d.h. batterieelektrische und Brennstoffzellen-Lkw, zu 75 % von der Infrastrukturkomponente befreit. Mit PtL-Kraftstoffen (teilweise) betankte Lkw können von dieser Bevorzugung in der Lkw-Maut nicht profitieren und unterliegen vollständig der CO₂-Bepreisung der Lkw-Maut. Dementsprechend ist davon auszugehen, dass batterieelektrische Lkw eine entscheidende Rolle für die THG-Emissionsminderung im Straßengüterverkehr übernehmen werden, wie es auch die Clean-Room Gespräche des BMDV/NOW deutlich gemacht haben (NOW 2023). Der CO₂-Preis durch das BEHG bzw. den EU-ETS 2 wirkt unterstützend für den Antriebswechsel im Straßengüterverkehr und kann vor allem bei ungünstigen Rahmenbedingungen und Einsatzprofilen (hoher Anteil des öffentlichen Ladens bzw. niedrige Fahrleistungen bei mittleren Ladepreisen) unterstützend wirken.

Die Voraussetzung für den Antriebswechsel ist der Aufbau der für den Einsatz von batterieelektrischen Lkw notwendigen Ladeinfrastruktur sowie die technische Weiterentwicklung und der Aufbau von Produktionskapazitäten batterieelektrischer Lkw. Der Aufbau der Ladeinfrastruktur und der Produktionskapazitäten ist über die Zeit zu erwarten. Mit der 2023 beschlossenen Novelle der AFIR¹⁶ wird zumindest ein Kernnetz an Ladeinfrastruktur und mit der Novelle der CO₂-Flottenzielwerte für schwere Nutzfahrzeuge¹⁷ ein Mindestmaß an Neuzulassungen emissionsfreier Fahrzeuge angereizt.

Für die E-Fuel Nutzung in Lkw ist die THG-Quote das zentrale politische Instrument für den Hochlauf von Produktionskapazitäten und die Nutzung im gesamten Straßenverkehr; für die Vorgabe der THG-Emissionsminderung in der Kraftstoffversorgung des Verkehrssektors sind PtL-Kraftstoffe eine Zielerfüllungsoption, so dass ein Produktionsanreiz für PtL-Kraftstoffe entstehen kann. Der CO₂-Preis des BEHG bzw. EU-ETS 2 kann auch hierbei unterstützen. Im Moment besteht eine ausreichende Verfügbarkeit sonstiger Erfüllungsoptionen der THG-Quote, so dass eher niedrige Marktpreise in der THG-Quote zu erzielen sind.

Bei geringer Verfügbarkeit erneuerbarer Kraftstoffe kann sich jedoch die Situation ergeben, dass die Marktpreise der THG-Quote weit über den Produktionskosten der PtL-Kraftstoffe liegen. Ergänzend zur THG-Quote und zum BEHG bzw. EU-ETS 2 hat die EU-Kommission in ihrem Fit-for-55 Paket einen Vorschlag zur Novellierung der Energiesteuerrichtlinie vorgelegt. Inwieweit diese Novelle zum Tragen kommt, ist unklar. In dem Vorschlag zur Novelle der Energiesteuerrichtlinie sind unterschiedliche Energiesteuersätze für fossile und erneuerbare Kraftstoffe vorgesehen. Über differenzierte Energiesteuersätze könnte indirekt ein weiteres CO₂-Bepreisungselement für Kraftstoffe entstehen, welches über das BEHG bzw. EU-ETS 2 hinausgeht.

Bei dem möglichen Einsatz von E-Fuels ist ebenfalls zu beachten, dass heute keine nennenswerten Produktionskapazitäten für E-Fuels bereitstehen. Verfügbare Kapazitäten lassen sich erst über einen längeren Zeitraum aufbauen, da die Skalierung der gesamten Herstellungskette noch bevor steht (Neuling und Berks 2023). Für die Nutzung von grünem Wasserstoff, der die stoffliche Ausgangsbasis der E-Fuel-Herstellung ist, besteht zudem eine

¹⁶ Alternative Fuel Infrastructure Regulation (EU) 2023/1804 (vormals AFID: Alternative Fuel Infrastructure Directive)

¹⁷ (EU) 2024/1610

Nutzungskonkurrenz mit anderen Anwendungsbereichen wie dem Industriesektor und dem Luft- und Seeverkehr.

3.2 Fallbeispiel Batterieelektrischer Pkw und E-Fuels

Die Transformation der Automobilindustrie ist in dem Bereich der Pkw bereits sehr viel weiter fortgeschritten als bei den Lkw. 13 % der Pkw-Neuzulassungen in der EU waren im Jahr 2022 reine batterieelektrische Fahrzeuge (ICCT 2023). Mit der Überarbeitung der CO₂-Flottenzielwerte für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge¹⁸ besteht die gesetzlich festgelegte Anforderung an die Automobilhersteller ab dem Jahr 2035 nur noch emissionsfreie Pkw neu zuzulassen. Grundsätzlich berücksichtigen die CO₂-Flottenzielwerte die „Tank-to-Wheel“-Emissionen, d.h. dass die Pkw-Neuzulassungen in der EU ab dem Jahr 2035 keine direkten Emissionen mehr verursachen dürfen. Offen ist jedoch noch eine Regelung, mit der auch vollständig mit emissionsfreien E-Fuel betankte Fahrzeuge als emissionsfreie Pkw im Rahmen der CO₂-Flottenzielwerte klassifiziert werden können. Entsprechend vergleichen wir in diesem Abschnitt rein batterieelektrische Pkw mit Pkw, die vollständig mit E-Fuels betrieben werden. Wie bei den Lkw findet aufgrund der kurzen Haltedauer von Erstnutzern ein Vergleich der Gesamtnutzungskosten statt; die Betriebskosten alleine werden anders als bei der Betrachtung im Wärmesektor nicht miteinander in Vergleich gebracht.

Anders als bei den Lkw ist keine über das BEHG bzw. den EU-ETS 2 hinausgehende CO₂-Bepreisung implementiert oder vorgesehen.

3.2.1 Gesamtnutzungskosten

Für die Kaufentscheidung im Pkw-Segment spielen viele Faktoren eine Rolle. Neben Kostenbetrachtungen sind für diese Endverbraucheranwendung u.a. emotionale Aspekte wie beispielsweise Markenbindung, Einfluss auf den sozialen Status und subjektive Nutzungsanforderungen relevanter für die Kaufentscheidung als im Bereich der von Wirtschaftsunternehmen eingesetzten Lkw. Für einen Wechsel auf neue Antriebstechnologien, die mit Änderungen der Verhaltensmuster einher gehen können (längere oder häufigere Zwischenstopps zum Nachladen, Nutzung privater Ladeoptionen), ist ein Vorteil in den Gesamtnutzungskosten jedoch trotzdem ein starker Anreiz für Käufer*innen sich gegen fossil angetriebene Fahrzeuge und für emissionsfreie Alternativen zu entscheiden. Im Gegensatz zu Lkw sind die Gesamtnutzungskosten von Pkw aufgrund der vergleichsweise geringeren Fahrleistungen stärker durch die Fahrzeuganschaffung geprägt. Abbildung 10 zeigt exemplarisch die Gesamtnutzungskosten eines Mittelklasse-Pkw über eine Haltedauer von 5 Jahren und einer jährlichen Fahrleistung von 15.000 Kilometern, der im Jahr 2025 neu angeschafft wird. Die zugrundeliegenden Daten basieren auf dem Projektionsbericht 2023 des Umweltbundesamtes (Harthan et al. 2023). Verglichen werden ein konventioneller Pkw mit Verbrennungsmotor für Benzin-Kraftstoff (ICEV), ein batterieelektrisches Fahrzeug (BEV) und ein verbrennungsmotorisches Fahrzeug mit Nutzung von auf Basis von Strom erzeugten Benzin-Kraftstoffen (PtL).

- Der aufgeführte **Anschaffungspreis** berücksichtigt neben dem Kaufpreis des Fahrzeugs den Restwert¹⁹ nach der Haltedauer und eine Finanzierung mit einer Zinsrate von 5 %. Im Vergleich zum Benziner-Pkw verursacht der batterieelektrische Pkw im Jahr 2025 noch Mehrkosten in der Anschaffung. Es ist aber davon auszugehen, dass mit einer immer stärker

¹⁸ (EU) 2023/851

¹⁹ Für alle Antriebstypen sind typische Restwertverläufe aus heute etablierten Antriebstechnologien hinterlegt.

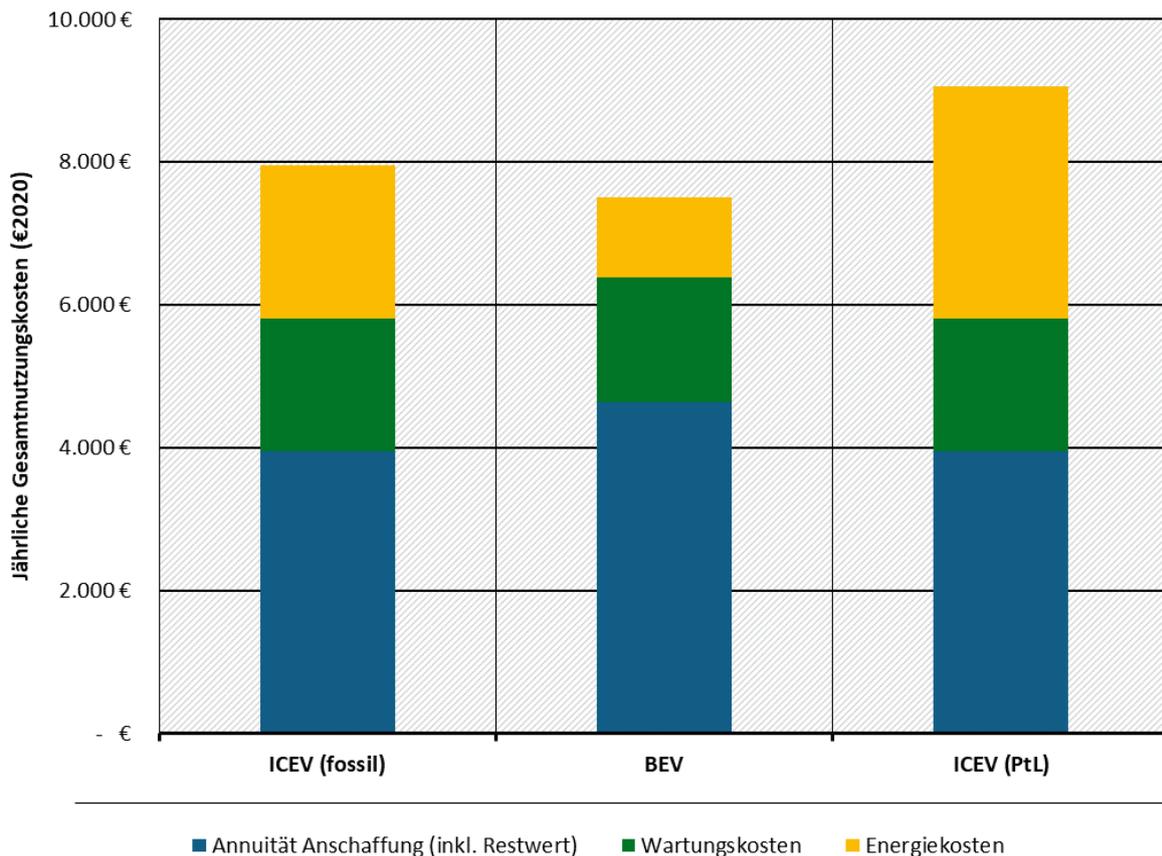
werdenden Hochskalierung der batterieelektrischen Fahrzeuge diese Mehrkosten bei der Anschaffung nach dem Jahr 2025 immer weiter marginalisieren.

- ▶ Die **Wartungskosten** sind für die elektrischen Antriebe aufgrund der geringeren Anzahl von Verschleißteilen und dem geringeren Bedarf nach u.a. Schmierstoffen etwas geringer.
- ▶ Die **Energiekosten** sind für batterieelektrische Pkw aufgrund des um rund zwei Drittel geringeren Energieverbrauchs (inklusive von Ladeverlusten) gegenüber den verbrennungsmotorischen Antrieben deutlich geringer. Die in der Darstellung angenommenen Energiepreise betragen 1,90 Euro/l²⁰ für fossiles Benzin (inklusive eines CO₂-Preises von 80 Euro/t CO₂²¹), 3,00 Euro/l für strombasiertes Benzin und 36 Cent/kWh für Strom. Dabei sind in den Energiepreisen alle Steuern, Abgaben und Umlagen enthalten.

Abbildung 10 zeigt die Ergebnisse der Kostenanalysen. Die geringeren Energie- und Wartungskosten von batterieelektrischen Pkw (BEV) gleichen die Mehrkosten in der Anschaffung über eine Haltedauer von 5 Jahren aus und führen in Summe mit rund 7.500 Euro pro Jahr zu etwas geringeren Gesamtnutzungskosten im Vergleich zu Pkw mit Verbrennungsmotor (ICEV (fossil)), der mit fossilem Benzin genutzt wird (rund 7.950 Euro pro Jahr). Im Vergleich zu Pkw mit Verbrennungsmotor (ICEV (PtL)), der mit PtL genutzt wird (über 9.000 Euro pro Jahr) liegen die Gesamtnutzungskosten der elektrischen Pkw deutlich niedriger.

²⁰ Die höheren PtL-Preise im Vergleich zur Kostenrechnung der Lkw sind darin begründet, dass bei der Nutzung von Pkw von Privatperson die Mehrwertsteuer zu entrichten ist. Diese entfällt für Wirtschaftsakteure.

²¹ Dieser Wert entspricht dem durchschnittlichen CO₂-Preis in der Modellierung des Projektionsberichts 2023 (Harthan et al. 2023) und des Projektionsberichts 2024 (Harthan et al. 2024).

Abbildung 10: Gesamtnutzungskosten (TCO) der Pkw-Antriebstechnologien²² inklusive des CO₂-Preises aus dem BEHG im Jahr 2025

Quelle: Öko-Institut

In der Praxis hängen die tatsächlichen Kostenvorteile der BEV entsprechend den dargestellten Verhältnissen in den Gesamtnutzungskosten neben dem Anschaffungspreis von den Einsparmöglichkeiten im Betrieb ab. Daher werden in Abbildung 11 die pro Jahr gefahrenen Kilometer und der Energiepreis über eine breite Spanne variiert und die jeweiligen Mehrkosten gegenüber einem Pkw unter Nutzung von fossilem Benzin ausgewiesen (ohne CO₂-Preis des BEHG). Zudem zeigt die Abbildung den zur Kompensation der Mehrkosten benötigten CO₂-Preis in fünf Preisstufen. Der Restwert und die Wartungskosten werden in Abhängigkeit der Jahresfahrleistung angepasst. Anschaffungspreis und Energieverbrauch entsprechen den Werten, die Abbildung 10 zugrunde liegen.

Für den überwiegenden Bereich der dargestellten Preis- und Fahrleistungsspannen erzielen batterieelektrische Pkw unter den verwendeten Kostenprognosen auch ohne CO₂-Preis Kostenvorteile gegenüber Pkw mit Benzin-Verbrennungsmotor. So ist in Abbildung 11 erkennbar, dass mit einer Jahresfahrleistung von 15.000 km und einem Strompreis an der Ladesäule von 36 Cent/kWh die Gesamtnutzungskosten eines batterieelektrischen Pkw schon ohne CO₂-Preis um 197 Euro niedriger sind verglichen mit einem Benzin-Pkw. Durch den effizienteren Antrieb steigen die Kostenvorteile proportional mit der Jahresfahrleistung. Nur für eine geringere Fahrzeugnutzung von unter 10.000 Kilometern im Jahr oder hohe Strompreise von über 44 Cent/kWh ist ein CO₂-Preis über 100 Euro/t CO₂ erforderlich, um Kostenvorteile für

²² ICEV: Fahrzeug mit Verbrennungsmotor (englisch: Internal combustion engine vehicle), BEV: Batterieelektrisches Fahrzeug (englisch: Battery electric vehicle), PtL: Strombasierter Flüssigkraftstoff, sogenannte E-Fuels (englisch: Power-to-Liquid)

batterieelektrische Pkw zu erreichen. Beispielsweise ist ein CO₂-Preis von über 400 Euro/t CO₂ notwendig, um die höheren Gesamtnutzungskosten eines batterieelektrischen Pkw gegenüber eines Benzin-Pkw von 437 Euro bei einer sehr niedrigen Jahresfahrleistung von 5.000 km und einem hohen Strompreis von 44 Cent/kWh auszugleichen. Werden überwiegend öffentliche Ladesäulen ohne Vertragsbindung (Adhoc-Laden) genutzt, die Preise von 60 Cent/kWh und mehr verursachen, werden auch bei hohen Laufleistungen CO₂-Preise über 100 Euro/t CO₂ benötigt, um gegenüber der Nutzung fossilen Benzins in Pkw ökonomische Vorteile zu bieten.

Für strombasierte Kraftstoffe ergeben sich keine Kostenvorteile über den betrachteten Parameterraum, da Anschaffung, Wartung sowie Energieverbrauch gleichbleiben und die Kosten von strombasierten Kraftstoffen auch bei optimistischen Preisprognosen immer über den Kosten für fossile Kraftstoffe liegen. Für das Szenario mit einer Jahresfahrleistung von 15.000 km und einem Preis von 2,40 Euro/l für strombasiertes Benzin sind die Gesamtnutzungskosten von mit E-Fuels betankten Benzin-Pkw um 663 Euro höher vergleichen mit der Nutzung von fossilen Benzin-Kraftstoffen, wenn kein CO₂-Preis existiert. Entsprechend ist selbst für geringe Preisannahmen von 2,40 Euro/l ein CO₂-Preis von über 200 Euro/t CO₂ nötig, um die Mehrkosten des strombasierten Kraftstoffs auszugleichen. Aufgrund der vergleichsweise geringen Effizienz des Antriebs steigt der zur Kompensation notwendige CO₂-Preis für einen Kraftstoffpreis von 2,70 Euro/l auf über 300 Euro/t CO₂.

Abbildung 11: Gesamtnutzungskosten (TCO) und notwendiger CO₂-Preis für Wirtschaftlichkeit von Batterie-Pkw und vollständig mit E-Fuels betankten Benzin-Pkw gegenüber der Nutzung von fossilen Benzin-Kraftstoffen

| ICEV (TCO pro Jahr) | | Jahresfahrleistung (km) | | | | |
|-------------------------------|------|-------------------------|---------|---------|----------|----------|
| | | 5.000 | 10.000 | 15.000 | 20.000 | 25.000 |
| Benzinpreis Tankstelle (€/l) | 1,8 | 5.632 € | 6.679 € | 7.722 € | 8.763 € | 9.800 € |
| BEV (Mehrkosten p. a.) | | Jahresfahrleistung (km) | | | | |
| | | 5.000 | 10.000 | 15.000 | 20.000 | 25.000 |
| Strompreis Ladesäule (ct/kWh) | 12,0 | 100 € | -426 € | -955 € | -1.484 € | -2.016 € |
| | 20,0 | 184 € | -258 € | -702 € | -1.148 € | -1.595 € |
| | 28,0 | 268 € | -90 € | -449 € | -811 € | -1.174 € |
| | 36,0 | 352 € | 79 € | -197 € | -474 € | -753 € |
| | 44,0 | 437 € | 247 € | 56 € | -137 € | -332 € |
| | 52,0 | 521 € | 415 € | 308 € | 199 € | 89 € |
| | 60,0 | 605 € | 584 € | 561 € | 536 € | 510 € |
| PtL-ICEV (Mehrkosten p. a.) | | Jahresfahrleistung (km) | | | | |
| | | 5.000 | 10.000 | 15.000 | 20.000 | 25.000 |
| PtL-Preis Tankstelle (€/l) | 2,10 | 113 € | 226 € | 339 € | 452 € | 566 € |
| | 2,40 | 221 € | 442 € | 663 € | 883 € | 1.104 € |
| | 2,70 | 329 € | 657 € | 986 € | 1.314 € | 1.643 € |
| | 3,00 | 436 € | 873 € | 1.309 € | 1.745 € | 2.181 € |
| | 3,30 | 544 € | 1.088 € | 1.632 € | 2.176 € | 2.720 € |
| | 3,60 | 652 € | 1.303 € | 1.955 € | 2.607 € | 3.259 € |
| | 3,90 | 759 € | 1.519 € | 2.278 € | 3.038 € | 3.797 € |

Legende:

Notwendiger CO₂-Preis zur Kompensation der Mehrkosten in €/tCO₂

| | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| < 100 | < 200 | < 300 | < 400 | > 400 |
|-------|-------|-------|-------|-------|

Quelle: Öko-Institut

3.2.2 Einordnung der Bedeutung des CO₂-Preises für die Kaufentscheidung und im Kontext weiterer Politikinstrumente

Die Gesamtnutzungskosten von Pkw sind ein entscheidender Parameter für die Kaufentscheidung von Neufahrzeugen; sie sind aber nicht alleine ausschlaggebend. Andere Kriterien wie unter anderem die Erreichbarkeit bestimmter Ziele von Fahrten, die Verfügbarkeit von Ladepunkten sowie Aspekte wie der soziale Status sind weitere Faktoren, die für die Wahl eines Pkw eine relevante Bedeutung haben (z. B. Hagman 2020; Walter et al. 2020). Weiterhin ist es so, dass bei den Neuwagenkäufer*innen Gesamtnutzungskostenrechnungen häufig nicht explizit durchgeführt werden, sondern „wahrgenommene Kostenrechnungen“ vorgenommen werden und dabei normalerweise die Anschaffungspreise eine stärkere Rolle spielen als mögliche, zukünftige Kosten während der Nutzung der Fahrzeuge. Berücksichtigt man dies, fallen die Kostenvorteile der batterieelektrischen Pkw während der Nutzungsphase in der Realität vermutlich weniger stark ins Gewicht als in Abbildung 10 und Abbildung 11 ausgewiesen.

Um die Kosten der CO₂-Bepreisung während der Nutzungsdauer bei verbrennungsmotorischen Pkw und die Kostenvorteile der batterieelektrischen Pkw zukünftig sichtbarer zu machen, sind im neuen Pkw-Effizienzlabel²³ entsprechende kumulierte Kosten für 10 Jahre bei 15.000 km Jahresfahrleistung auszuweisen. Zudem ist im Bereich der Privatkäufer*innen ein Trend zu mehr Leasing-Käufen zu verzeichnen (Dataforce 2023), bei denen die kostenseitigen und Gewährleistungsrisiken sich von den Fahrzeugkäufer*innen stärker auf die Leasing-Unternehmen verlagern und die Kostenvorteile der batterieelektrischen Pkw vermehrt sichtbar werden. Eine Stärkung des Leasing-Geschäfts durch die zu den Fahrzeugherstellern gehörenden Leasing-Unternehmen kann daher dazu zu führen, die zuvor genannten nicht-ökonomischen Barrieren für den Markt von batterieelektrischen Pkw besser als bisher zu überwinden. Mit neuen Fahrzeugmodellen und dem Erschließen weiterer Fahrzeugklassen sowie mit dem kontinuierlich fortschreitenden Aufbau der Ladeinfrastruktur in den nächsten Jahren ist davon auszugehen, dass sich die Kostenvorteile der batterieelektrischen Pkw in höheren Zulassungszahlen für batterieelektrische Pkw niederschlagen werden.

Für die mit E-Fuels betriebenen Pkw ist festzuhalten, dass sie kostenseitig dem batterieelektrischen Pkw deutlich im Kostennachteil sind. Über die THG-Quote wird der Anteil von E-Fuels in den Flüssigkraftstoffen, wenn diese denn für den Verkehrssektor in relevanten Mengen zur Verfügung stehen werden, voraussichtlich kontinuierlich steigen, da entsprechende Preissignale über die THG-Quote zu erwarten sind. Über die angedachte Regelung innerhalb der CO₂-Flottenzielwerte für Pkw dürften aller Voraussicht nach – wenn überhaupt – maximal Nischenanwendungen für vollständig mit E-Fuels betankte Pkw in Frage kommen.

²³ Zweite Verordnung zur Änderung der Pkw-Energieverbrauchskennzeichnungsverordnung (BGBl. 2024 I Nr. 50 vom 22.02.2024)

4 Diskussion und Schlussfolgerungen

Die Kosten- und Wirtschaftlichkeitsberechnungen aus der vorliegenden Studie für relevante Klimaschutztechniken im Gebäude- und Verkehrsbereich zeigen eine Bandbreite an verschiedenen CO₂-Preisen auf, die notwendig sind damit diese Investitionen wirtschaftlich werden. Für den Gebäudesektor zeigen die Berechnungen für den Bereich der Heizungsanlagen (Wärmepumpe versus Gaskessel), dass die Wärmepumpe im hier typisierten sanierten Einfamilienhaus unter Berücksichtigung von Investitionsförderung bereits ohne CO₂-Preise wirtschaftlich ist, während sich für die anderen Fallkonstellationen Preise in der Bandbreite von 100 bis 285 Euro/t CO₂ ergeben. Neben der CO₂-Bepreisung spielen zudem die Stromtarife für Wärmepumpen eine wichtige Rolle. Für die berechneten Fallbeispiele der energetischen Sanierung ergibt sich für den Fall des Mehrfamilienhauses bereits ohne CO₂-Bepreisung eine Wirtschaftlichkeit der Sanierung, für den Fall des Einfamilienhauses ist dies erst mit einem CO₂-Preis von 175 Euro/t CO₂ (ohne Förderung) bzw. 70 Euro/t CO₂ (mit Förderung) gegeben. Zur breiten Anreizung von investiven Klimaschutzmaßnahmen im Gebäudebereich sind also CO₂-Preise erforderlich, die deutlich oberhalb des aktuellen Niveaus im BEHG liegen.

Batterieelektrische Pkw können in naher Zukunft in einer Gesamtkostenbetrachtung für einen relevanten Teil der Nutzungsfälle und vor allem bei hohen Fahrleistungen bereits ohne CO₂-Preis preisgünstiger werden als ihre verbrennungsmotorischen Pendanten. Sollten neue Pkw jedoch vor allem an Ladepunkten mit hohen Strompreisen geladen werden und nur für geringe Wegstrecken zum Einsatz kommen, kann der CO₂-Preis ein relevanter Bestandteil für die Marktfähigkeit von batterieelektrischen Pkw sein. Mit synthetischen Kraftstoffen sind dagegen aufgrund der höheren Kraftstoffkosten in vielen Szenarien CO₂-Preise von über 300 Euro/t CO₂ für die Kostenparität notwendig.

Bei den Lkw ist die Kostenrechnung eine andere und das erforderliche CO₂-Preis-Niveau für die Wirtschaftlichkeit der batterieelektrischen Lkw, welche voraussichtlich die primäre Klimaschutztechnologie sein werden, ist stark abhängig von der zurückgelegten Wegstrecke und dem Zugang zu günstigem Strom. Mit der derzeitigen Ausgestaltung der Lkw-Maut in Deutschland (CO₂-Kostenkomponente von 200 Euro/t CO₂) ist im Jahr 2030 bei bestimmten Anwendungsfällen und günstigen Strompreisen ein relevanter Kostenvorteil für batterieelektrische Lkw bereits ohne zusätzlichen CO₂-Preis gegeben. Im Fall von häufiger Ladung an eher teuren Ladepunkten und bei kurzen Fahrtstrecken stellt sich zukünftig jedoch erst durch den CO₂-Preis des BEHG bzw. des EU-ETS 2 ein Kostenvorteil für batterieelektrische Lkw ein – hier sind kombinierte CO₂-Preisniveaus aus Maut und BEHG bzw. EU-ETS 2 von 300 bis 400 Euro/t CO₂ erforderlich. Für strombasierte Dieselmotoren stellt sich bedingt durch die höheren Kraftstoffkosten ohne CO₂-Preis nie eine Kostenparität ein. Unter der Annahme von strombasierten Kraftstoffpreisen in Höhe von mindestens 2,50 Euro/l sind für die Wirtschaftlichkeit dieser Technik kombinierte CO₂-Preise von über 300 Euro/t CO₂ notwendig.

Beiden Sektoren ist gemein, dass die Entscheidungsfindung für oder wider die Nutzung einer Klimaschutztechnik nicht alleine ökonomischen Rationalitäten einer Gesamtnutzungskostenrechnung unterliegt. Die in der Analyse dargestellten Ergebnisse lassen somit keine unmittelbaren quantitativen Schlussfolgerungen zu, wie stark sich die veränderte Wirtschaftlichkeit auf die Diffusion der jeweiligen Technologien auswirkt. Abschließend lässt sich zusammenfassen, dass sich die zur Absicherung der Klimaziele notwendigen technologischen Umstiege im Gebäude- und Verkehrsbereich („Backstop-Technologien“) in der Breite nur durch CO₂-Preise anreizen lassen, die deutlich oberhalb des aktuellen Niveaus im BEHG liegen. Zur Steigerung der effektiven Wirkung des CO₂-Preises sollte dieser aber sinnvoll in einen Mix aus klimapolitischen Instrumenten eingebettet sein bzw. werden. Dieser Mix muss

insbesondere auf den Abbau weiterer nicht-ökonomischer Wirkungshemmnisse ausgerichtet sein.

5 Quellenverzeichnis

- ADAC (Hg.) (2024): Ladetarife für Elektroautos: Anbieter und Kosten im Vergleich. Unter Mitarbeit von André Gießel. Online verfügbar unter <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/laden/elektroauto-ladesaeulen-strompreise/>, zuletzt geprüft am 30.10.2024.
- Breg - Bundesregierung (Hg.) (2024): Fragen und Antworten zu den Energiepreisbremsen. Online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/breg-de/service/datenschutzhinweis/strompreisbremse-2125002>, zuletzt geprüft am 30.10.2024
- Bundesnetzagentur (BNetzA), Bundeskartellamt (Hg.) (2023): Monitoringbericht 2023 der Bundesnetzagentur und des Bundeskartellamtes. Online verfügbar unter <https://data.bundesnetzagentur.de/Bundesnetzagentur/SharedDocs/Mediathek/Monitoringberichte/MonitoringberichtEnergie2023.pdf>, zuletzt geprüft am 28.03.2024.
- Dataforce (Hg.) (2023): Dataforce Leasing Studie 2023. Stagnierende Leasinganteile im Flottenbestand. Frankfurt. Online verfügbar unter <https://www.dataforce.de/news/dataforce-leasing-studie-2023/>, zuletzt geprüft am 22.07.2024.
- Fraunhofer ISE (27.07.2020): Auch in Bestandsgebäuden funktionieren Wärmepumpen zuverlässig und sind klimafreundlich. Feldtest des Fraunhofer ISE abgeschlossen. Freiburg. Online verfügbar unter <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2020/waermpumpen-funktionieren-auch-in-bestandsgebaeuden-zuverlaessig.html>, zuletzt geprüft am 22.07.2024.
- Graichen, J.; Ludig, S. (2024): Supply and demand in the ETS 2. Assessment of the new EU ETS for road transport, buildings and other sectors. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Öko-Institut. Dessau-Roßlau (Climate Change, 09/2024). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/supply-demand-in-the-ets-2>, zuletzt geprüft am 22.07.2024.
- Hagman, Jens (2020): Diffusion of Battery Electric Vehicles. The Role of Total Cost of Ownership. Doctoral Thesis. KTH Royal Institute of Technology, Stockholm. Online verfügbar unter <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1458540/FULLTEXT01.pdf>, zuletzt geprüft am 22.07.2024.
- Harthan, R.; Adam, S.; Bei der Wieden, M.; Borkowski, K.; Böttcher, H.; Braungardt, S. et al. (2023): Projektionsbericht 2023 für Deutschland. 2. Auflage. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Öko-Institut; Fraunhofer ISI; IREES; Thünen-Institut. Dessau-Roßlau (Climate Change, 39/2023). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/projektionsbericht-2023-fuer-deutschland>, zuletzt geprüft am 07.08.2024.
- Harthan, Ralph O.; Förster, Hannah; Borkowski, Kerstin; Braungardt, Sibylle; Bürger, Veit; Cook, Vanessa et al. (2024): Technischer Anhang der Treibhausgas-Projektionen 2024 für Deutschland (Projektionsbericht 2024). Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/projektionen_technischer_anhang_0.pdf, zuletzt geprüft am 10.07.2024.
- ICCT (Hg.) (2023): European Passenger Car and Light Commercial Vehicle Registration: January-December 2022. Market Monitor. Fact Sheet. Online verfügbar unter <https://theicct.org/wp-content/uploads/2023/02/market-monitor-eu-jan-to-dec-feb23.pdf>, zuletzt geprüft am 22.07.2024.
- Loga, Tobias; Stein, Britta; Diefenbach, Nikolaus; Born, Rolf (2015): Deutsche Wohngebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden. 2. erweiterte Auflage. Institut Wohnen und Umwelt (IWU). Online verfügbar unter https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/gebaeudebestand/episcope/2015_IWU_LogaEtAl_Deutsche-Wohngeb%C3%A4udetypologie.pdf, zuletzt geprüft am 15.03.2024.

Miara, Marek (2021): Wie gut funktionieren Wärmepumpen im Gebäudebestand? Fraunhofer ISE. Online verfügbar unter <https://blog.innovation4e.de/2021/03/03/wie-gut-funktionieren-waermepumpen-im-gebaeudebestand/>, zuletzt geprüft am 22.07.2024.

Neuling, Ulf; Berks, Leon (2023): E-Fuels zwischen Wunsch und Wirklichkeit. Was strombasierte synthetische Kraftstoffe für die Energiewende im Verkehr leisten können - und was nicht. Diskussionspapier. Agora Verkehrswende. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.agora-verkehrswende.de/veroeffentlichungen/e-fuels-zwischen-wunsch-und-wirklichkeit>, zuletzt geprüft am 22.07.2024.

NOW (Hg.) (2023): Marktentwicklung klimafreundlicher Technologien im schweren Straßengüterverkehr. Auswertung der Cleanroom-Gespräche 2022 mit Nutzfahrzeugherstellern. Online verfügbar unter <https://www.klimafreundliche-nutzfahrzeuge.de/wp-content/uploads/2023/02/Marktentwicklung-klimafreundlicher-Technologien-im-schweren-Strassengueterverkehr.pdf>, zuletzt geprüft am 22.07.2024.

Schrems, Isabel; Fiedler, Swantje; Zertzawy, Florian; Hecker, Janis (2023): Einführung eines Emissionshandelssystems für Gebäude, Straßenverkehr und zusätzliche Sektoren in der EU. Übersicht zur Ausgestaltung des neuen EU-ETS 2. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/factsheet_einfuehrung_eines_emissionshandelssystems.pdf, zuletzt geprüft am 22.07.2024.

Verivox (2024): THG-Quote Preisentwicklung. Darum schwankt die THG-Prämie so stark. Online verfügbar unter <https://www.verivox.de/elektromobilitaet/thg-quote/preisentwicklung/>, zuletzt geprüft am 22.07.2024.

Walter, Antonia; Held, Maximilian; Pareschi, Giacomo; Pengg, Hermann; Madlener, Reinhard (2020): Decarbonizing the European Automobile Fleet: Impacts of 1.5 °C-Compliant Climate Policies in Germany and Norway. Hg. v. FCN (FCN Working Paper, 18/2020). Online verfügbar unter https://www.fcneonerc.rwth-aachen.de/global/show_document.asp?id=aaaaaaabbfpvtl, zuletzt geprüft am 22.07.2024.

A Anhang 1: Methodik zur Berechnung der Kosten im Gebäudebereich

Die Berechnung der energetischen Parameter (z. B. spezifischer Endenergie- und Primärenergieverbrauch, Wärmeschutzstandard) erfolgt über ein vom Institut für Wohnen und Umwelt (IWU) entwickeltes Rechenverfahren (TABULA-Verfahren) (Loga et al. 2015; Reuters 24.05.2021; Zech et al. 2019). Dieses umfasst eine bauteilspezifische Betrachtung. Es findet gleichzeitig eine Korrektur der rechnerisch ermittelten Bedarfswerte auf reale Verbrauchswerte statt. Dies ist insbesondere für unsanierte Wohngebäude wichtig, da bei diesen die rechnerische Ermittlung des Wärmeenergiebedarfs nach dem technischen Normenwerk systematisch zu überhöhten Werten führt und damit die Einsparungen aus energetischen Sanierungsmaßnahmen systematisch überschätzt werden.

Als energetische Zielzustände können verschiedene Sanierungsniveaus gewählt werden. Dies kann über eine Vollsanierung oder Bauteilsanierungen erfolgen.

Die Effizienzhausstandards werden jeweils durch zwei Kennwerte charakterisiert, den (nicht-erneuerbaren) Primärenergiebedarf PE_{ne} sowie den hüllflächenbezogenen Transmissionswärmeverlust H_T' . Die Effizienzhausstandards legen für beide Kennwerte Höchstgrenzen in Abhängigkeit vom jeweiligen Referenzgebäude nach dem GEG fest. Bei den Typgebäuden wird H_T' durch die Wahl der U-Werte²⁴ der Bauteile „angesteuert“, PE_{ne} sowohl durch die U-Werte als auch die Wahl des Heizsystems inkl. Energieträger.

Die Berechnung der Investitionskosten erfolgt getrennt für die Wärmeschutzmaßnahmen an der Gebäudehülle (Außenwände, Dach, Kellerdecke, Fenster) sowie die Versorgungstechnik. Die Kostenansätze wurden aus verschiedenen Quellen übernommen, v. a. (Loga et al. 2015), (Hinz 2015), (BBSR - Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung 2017) und (Zech et al. 2019). Die Basis für die Kostenrechnung bilden aus empirischen Daten abgeleitete Kostenfunktionen. Für die Kosten der Wärmeschutzmaßnahmen weisen (IWU und Fraunhofer IFAM 2015) getrennte Kostenfunktionen für die Vollkosten sowie die energiebedingten Mehrkosten aus. Alle Kostenansätze erfassen neben den reinen Technikkosten auch die Kosten für die Installation; bei den Versorgungstechniken zudem die Kosten für die anlagentechnische Peripherie (z. B. Armaturen, Ausdehnungsgefäß, Umwälzpumpen, Regelung; nicht jedoch den Speicher).

Die Skalierung auf die aktuelle Preisbasis erfolgt anhand des Baupreisindex des Statistischen Bundesamts.²⁵ Die Kostenansätze wurden anhand aktueller Kostendaten, z.B. (Peters et al. 2023) verifiziert. Für Betrachtungen über das Jahr 2022 hinaus wird der Baupreisindex auf Basis vergangener Werte extrapoliert.

Die Investitionskosten werden getrennt nach Vollkosten und energiebedingten Mehrkosten betrachtet. Für die Abschätzung der energiebedingten Mehrkosten liegt die Annahme zugrunde, dass die energetische Sanierung nach dem Kopplungsprinzip im Rahmen des normalen Investitionszyklus erfolgt. Dies bedeutet, dass das Gebäude zum Zeitpunkt der Sanierung ohnehin renoviert würde. Die energetischen Mehrkosten resultieren dann in Form von Zusatzkosten zu den ohnehin anfallenden Renovierungskosten („Ohnehin-Kosten“). Im Falle des Fenstertauschs ergeben sich die energetischen Mehrkosten dann z. B. aus der Kostendifferenz von Fenstern mit 3-fach Wärmeschutzverglasung zu Fenstern mit 2-fach Wärmeschutzverglasung, die dem Mindeststandard einer Renovierung entsprechen (und nach Anlage 7 GEG ohnehin eingebaut werden müssten). Bei den Versorgungstechniken bildet die Referenz ein Gas-Brennwertkessel, d. h. die energiebedingten Mehrkosten reflektieren die

²⁴ Der U-Wert (Wärmedurchgangskoeffizient) beschreibt, wie gut ein Bauteil, wie zum Beispiel eine Wand oder ein Fenster, die Wärme durchlässt, und gibt somit Auskunft über die Wärmeisolationseigenschaften des Bauteils.

²⁵ <https://bki.de/baupreisindex.html>

Kostendifferenz zwischen z. B. einer Wärmepumpe oder einem Pelletkessel und einem Gas-Brennwertkessel. Die Investitionskosten können mit und ohne Förderung berechnet werden. Für die hier betrachteten Beispielgebäude ergeben sich die in Tabelle 3 dargestellten Werte.

Tabelle 3: Grundlagen für die Berechnungen der Fallbeispiele im Gebäudesektor

| | EFH unsaniert | EFH saniert | MFH unsaniert | MFH saniert |
|--|------------------|----------------|------------------|----------------|
| Wohnfläche (m²) | 110 | 110 | 426 | 426 |
| Vollkosten Versorgungstechnik Wärmepumpe (Euro/m²) | 283 | 187 | 173 | 98 |
| Vollkosten Versorgungstechnik Gaskessel (Euro/m²) | 82 | 109 | 27 | 23 |
| Endenergie bezogen auf Wohnfläche Gas (kWh/m²) | 258 | 126 | 178 | 88 |
| Endenergie* bezogen auf Wohnfläche WP (kWh/m²) | 220 | 120 | 169 | 84 |
| Preis Gas (ct/kWh) | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Preis WP-Strom (ct/kWh) | 28 | 28 | 28 | 28 |
| Jahresarbeitszahl WP | 2,5 | 3,0 | 2,5 | 3,0 |

*inkl. Umweltwärme

A.1 Quellenverzeichnis Anhang

BBSR - Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (2017): EnEV 2017 – Vorbereitende Untersuchungen. Hg. v. BBSR -Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. Bonn (BBSR-Online-Publikation, 16/2017). Online verfügbar unter https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2017/bbsr-online-16-2017-dl.pdf?__blob=publicationFile&v=1, zuletzt geprüft am 16.02.2024.

Reuters (24.05.2021): Czech government to look at speedier coal exit than 2038 target. Online verfügbar unter <https://www.reuters.com/article/czech-coal-idUSL5N2NB20Z>, zuletzt geprüft am 06.09.2021.

Hinz, Eberhard (2015): Kosten energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Altbauten. Endbericht. Institut für Wohnen und Umwelt (IWU). Darmstadt. Online verfügbar unter <https://www.iwu.de/forschung/handlungslogiken/kosten-energierelevanter-bau-und-anlagenteile-bei-modernisierung/>, zuletzt geprüft am 16.02.2024.

IWU; Fraunhofer IFAM (2015): Monitoring der KfW-Programme „Energieeffizient Sanieren“ und „Energieeffizient Bauen“ 2014.

Loga, Tobias; Stein, Britta; Diefenbach, Nikolaus; Born, Rolf (2015): Deutsche Wohngebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden. 2. erweiterte Auflage. Institut Wohnen und Umwelt (IWU). Online verfügbar unter https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/gebaeudebestand/episcopes/2015_IWU_LogaEtAl_Deutsche-Wohngeb%C3%A4udetypologie.pdf, zuletzt geprüft am 15.03.2024.

Peters, Max; Bartenstein, Boris; Heibisch, Holger; Kaiser, Christian; Anders, Florian (2023): Kommunale Wärmeplanung - Einführung in den Technikkatalog. Version 1.1. Hg. v. Ministerium für Umwelt, Klima und

Energiewirtschaft Baden-Württemberg (UM BW). KEA Klimaschutz und Energieagentur Baden-Württemberg (KEA-BW). Online verfügbar unter https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/um/intern/Dateien/Dokumente/2_Presse_und_Service/Publikationen/Energie/Kommunale-Waermeplanung-Einfuehrung-in-den-Technikkatalog.pdf, zuletzt geprüft am 23.07.2024.

Zech, Daniel; Ullrich, Simone; Wülbeck, Hans-Friedrich; Stuble, Achim; Wapler, Jeannette; Valenbreder, Paul et al. (2019): Evaluation des Marktanreizprogramms zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt im Förderzeitraum 2015 bis 2018. Evaluation des Förderjahres 2018. Ausarbeitung im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Fichtner; Fraunhofer ISE; TFZ; Qoncept Energy; DBI-Gas- und Umwelttechnik; IE Leipzig. Stuttgart. Online verfügbar unter https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/Berichte/evaluierung-marktanreizprogramm-2018.pdf?__blob=publicationFile&v=3, zuletzt geprüft am 09.08.2023.