

ERREICHUNG DER KLIMANEUTRALITÄT BIS 2045 MITTELS CO₂-BEPREISUNG IN DEN SEKTOREN VERKEHR UND GEBÄUDE

Alexander BURKHARDT*, Markus BLESL

Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER),
Heißbrühlstr. 49a 70565 Stuttgart, +49 711 685 87500, alexander.burkhardt@ier.uni-stuttgart.de,
<https://www.ier.uni-stuttgart.de/institut/>

Kurzfassung: Deutschland hat sich mit dem neuen Klimaschutzgesetz dem Ziel der Klimaneutralität bis 2045 verschrieben. Hierfür müssen in allen Sektoren die CO₂-Emissionen signifikant gesenkt werden. Ein Instrument, um CO₂-Emissionen zu senken, ist die CO₂-Bepreisung. Diese wurde in Deutschland für die Sektoren Verkehr und Gebäude im Jahr 2021 eingeführt. Mittels des Energiesystemmodells TIMES PanEU wurde untersucht, welche CO₂-Preispfade geeignet sind, um das Ziel der Klimaneutralität zu erreichen. Betrachtet man die Höhe der CO₂-Emissionen im Jahr 2045, so mindern im Gebäudesektor 3 der 22 betrachteten CO₂-Preispfade die CO₂-Emissionen stärker als das Referenzszenario. Im Verkehrssektor erreicht keiner der Preispfade die Ziele aus dem Referenzszenario. Vergleicht man die Summe der CO₂-Emissionen von 2025-2050 im Verkehrssektor, so erreichen 12 der 22 weniger Emissionen. Im Gebäudesektor sind es nur 4 der 22 Preispfade, die in Summe ab 2025 weniger CO₂-Emissionen nach sich ziehen. Weder im Gebäude- noch im Verkehrssektor werden die Ziele des Referenzlaufs für 2025 erreicht. Kurzfristig ist der Einfluss der CO₂-Bepreisung also begrenzt. Im Zeitraum von 2030 bis 2040 gelingt es jedoch insbesondere im Verkehrssektor, die Emissionen stärker als im Referenzszenario zu senken, so dass für manche Preispfade immerhin in Summe weniger CO₂ ausgestoßen wird. Eine tiefe Dekarbonisierung, also eine Senkung der CO₂-Emissionen im Jahr 2045 unter das Niveau des Referenzlaufs ist aber nur mit sehr hohen CO₂-Preisen möglich. Zudem konnte gezeigt werden, dass der Nutzen von frühzeitig hohen CO₂-Preisen in den beiden Sektoren unterschiedlich stark ausfällt.

Keywords: CO₂-Preis, Klimaneutralität, Klimaschutzgesetz, Verkehr, Gebäude

1 Motivation und Ziel

Mit dem Klimaschutzgesetz der Bundesregierung hat Deutschland das Ziel der Klimaneutralität bis 2045 gesetzlich verankert. Hierzu sind tiefgreifende Transformationen in allen Sektoren notwendig. Es liegen bereits einige Studien vor, die mehrere mögliche, kostenoptimale Pfade zur Erreichung dieser Ziele skizzieren. [1, 2] Allerdings existieren bisher nur wenige Studien dazu, mit welchen Instrumenten die politisch gesteckten Ziele erreicht werden können. Eines der Instrumente, das derzeit im Fokus vieler Diskussionen steht, ist die CO₂-Bepreisung. Europaweit gibt es einen solchen CO₂-Preis bereits für einige Sektoren in Form des Europäischen Emissionshandelssystems (EU-ETS). Darüber hinaus existieren in einigen Ländern nationale CO₂-Preise, die für einzelne Sektoren gelten.

So hat Deutschland seit 2021 einen CO₂-Preis für die Sektoren Gebäude und Wärme im Rahmen des Brennstoffemissionsgesetzes (BEHG) eingeführt. Allerdings liegt das

Preisniveau dort zu Beginn nur bei 25€/t CO₂ und steigt bis 2025 auf 55 €/t CO₂. Für das Jahr 2026 soll sich der Preis in einem Korridor von 55 bis 65 €/t CO₂ frei am Markt bilden. Darüber hinaus existieren in Deutschland keine weiteren Festlegungen. [3]

Andere Länder setzen ebenfalls auf eine Bepreisung von CO₂-Emissionen. So gibt es beispielsweise in Schweden, der Schweiz und Frankreich CO₂-Steuern bzw. Abgaben, die dem deutschen BEHG in seiner derzeitigen Ausgestaltung bis 2025 ähneln. [4] Darüber gibt es auch diverse Cap and Trade-Systeme, so zum Beispiel in Kalifornien, Quebec oder China. [5]

CO₂-Preise in Form von CO₂-Steuern bzw. Abgaben weltweit reichten 2021 von unter einem Dollar bis zu 137 US\$/t CO_{2e}. Bei Emissionshandelssystemen lagen die Preise zwischen 1,1 und 49,8 US\$/t CO_{2e}. Dabei wurden im Jahr 2021 21,5% der globalen Treibhausgasemissionen von diesen CO₂-Bepreisungssystemen erfasst, 2020 waren es dagegen nur 15,1%. [5]

Die innerhalb der EU, zusätzlich zum EU-ETS, etablierten CO₂-Bepreisungsinstrumente zielen in der Regel auf die nicht vom EU-ETS abgedeckten Sektoren ab. Die anteilig größten Emittenten sind hierbei der Verkehrs- sowie der Gebäudesektor. Diese werden EU-weit in der sogenannten „Effort Sharing Regulation“ (ESR) geregelt.

Dabei ist eine Reduktion in den ETS-Sektoren im Vergleich zu den ESR-Sektoren zwar leichter zu erreichen. Zur Erreichung der EU-Klimaziele bis 2030 liegen die notwendigen CO₂-Preise für die ESR-Sektoren mehr als doppelt so hoch wie für die ETS-Sektoren. [6] Jedoch ergeben sich aus Gesamtsystemsicht Nachteile, wenn der ETS-Sektor bis 2030 die Hauptlast der Emissionsminderungen trägt. Deswegen sollten die ESR-Sektoren auch mittelfristig (bis 2030) ebenfalls zur Emissionsminderung beitragen. [7]

Zudem wird darüber diskutiert, ob ein Emissionshandel oder eine Steuer besser geeignet ist, um die CO₂-Emissionen zu senken. Aus ökonomietheoretischer Sicht spricht einiges für ein *Cap and Trade* System, allerdings weist der EU-ETS in der Praxis Schwächen auf. [8] Zudem gibt es auch kritische Stimmen, die die Unsicherheit und damit einhergehende Probleme für Entscheidungsträger*innen von Emissionshandelssystemen betonen. [9]

Die Einführung von nationalen CO₂-Steuern ist in Europa zunächst simpler als die Erweiterung des EU-ETS. [8] Langfristig ist es jedoch effizienter, einen Sektor übergreifenden Preis zu etablieren. [10] Ohnehin muss die Politik abwägen, ob sie auch in den Sektoren Gebäude und Verkehr auf die CO₂-Bepreisung als zentrales Instrument setzen möchte, um die klimapolitischen Ziele umzusetzen, oder ob die CO₂-Bepreisung nur ein Instrument unter vielen sein sollte. [11] Um zu dieser Diskussion beizutragen, soll in dieser Untersuchung die Wirksamkeit von verschiedenen CO₂-Preispfaden hinsichtlich des Erreichens der Klimaneutralität untersucht werden.

2 Methodik

Ausgehend von einem Referenzszenario, das für Deutschland Klimaneutralität bis 2045 als Ziel vorgibt, wird untersucht, wie hoch die CO₂-Preise in den Sektoren Gebäude und Verkehr sein müssten, wenn die CO₂-Bepreisung als einziges Instrument eingesetzt werden würde, um Treibhausgasemissionsminderungen anzureizen. Diese Betrachtung bildet eine gute

Diskussionsgrundlage, um über die Ausgestaltung eines ausdifferenzierten Instrumentenmix in den beiden Sektoren nachzudenken.

Hierfür wird das Energiesystemmodell TIMES PanEU verwendet. Das Pan-Europäische TIMES Modell (TIMES PanEU) wurde für diverse Analysen des Europäischen Energiesystems verwendet. [7, 12] TIMES PanEU bildet 30 Regionen (EU und Norwegen, Schweiz und Vereinigtes Königreich) ab. Das Modell minimiert die Zielfunktion, die die gesamten diskontierten Systemkosten für den Zeitraum von 2010 bis 2050 darstellt. Dabei wird die perfekte Voraussicht aller Parameter unterstellt. Es wird ein vollständiger Wettbewerb zwischen den Technologien unterstellt, wobei jeweils der komplette Pfad von der Energiegewinnung bis zum Endenergieverbrauch abgebildet ist. [13]

Dabei werden für jede Region alle Sektoren, die mit Energienachfrage und -verbrauch einhergehen, abgebildet. Dies beinhaltet unter anderem die Bereitstellung der Primärenergie, die öffentliche sowie industrielle Erzeugung von Elektrizität und Wärme, die Endenergiesektoren Industrie, GHD, Haushalte, Landwirtschaft und Verkehr. Die schematische Darstellung eines TIMES Modells ist in Abbildung 1 gezeigt.

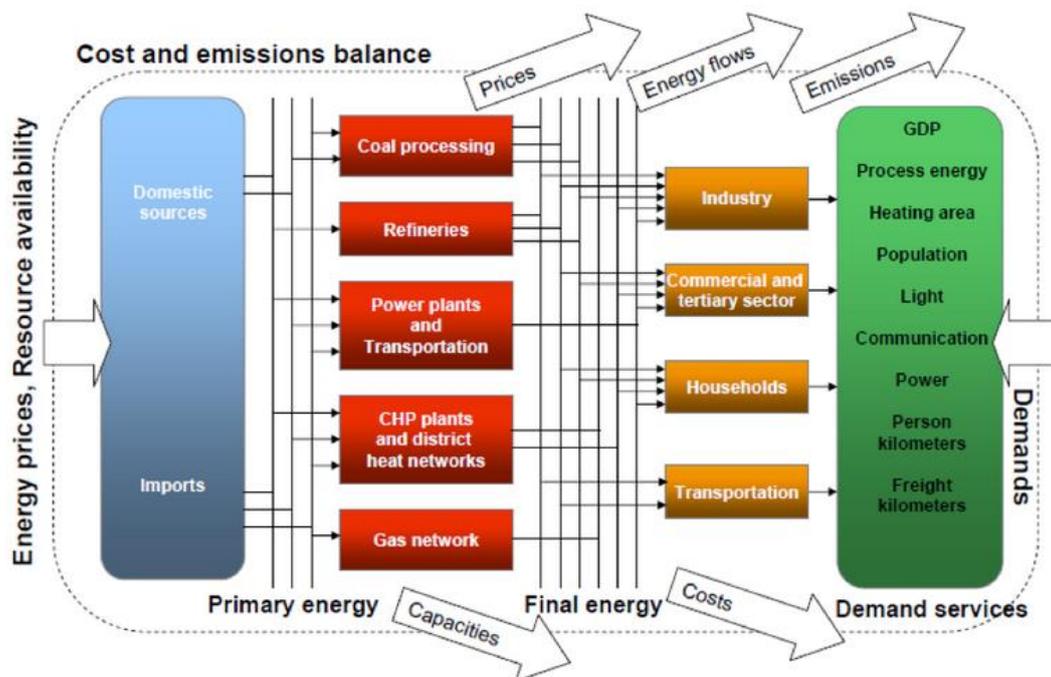


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Inputs und Outputs für ein TIMES Modell [13]

Auf Grund der oben genannten Überlegungen wird der jeweilige CO₂-Preis für alle Sektoren angewandt. So wird verhindert, dass sich Emissionen in andere Sektoren verlagern können. Im Modell ist die heutige (Ende 2021) Gesetzeslage im deutschen Gebäude- und Verkehrssektor abgebildet und wird als konstant angenommen. Die Energiepreise basieren auf dem „Sustainable Development Scenario“ des World Energy Outlook 2021. [14]

Für das Referenzszenario wird die Zielerreichung mit einem ausgewogenen Mix der Energieträger (Wasserstoff, synthetische Kraftstoffe und Strom) angestrebt. Das Ziel ist eine Reduktion der Nettotreibhausgasemissionen um 100% gegenüber 1990. Dabei wird der Import von Energieträgern auf Basis von Erneuerbaren Energien (z.B. grüner Wasserstoff, synthetische Kraftstoffe) auf maximal 350 TWh begrenzt. Der Einsatz von Biomasse wird auf

410 TWh begrenzt. Eine geologische Speicherung von CO₂ ist in begrenztem Umfang möglich (max. 50 Mt CO₂/Jahr), außerdem existiert ein Potential von CO₂-Senken i.H.v. bis zu 60 Mt CO₂/Jahr. Die Annahmen sind somit stark an das Technologiemixszenario aus [1] angelehnt. Alle genannten Preise sind auf das Jahr 2015 diskontiert.

Die Höhe der jeweiligen CO₂-Preise wird über CO₂-Preispfad-Szenarien bestimmt. Jeder Preispfad stellt dabei ein Szenario dar. Im Rahmen eines iterativen Prozesses wurden insgesamt 22 verschiedene Preispfade untersucht. Dabei wurden sowohl die Höhe des Anfangspreises, des Endpreises und der dazwischenliegenden Steigung variiert. Die Endpreise für das Jahr 2050 lagen zwischen 55 und 530 €/t CO₂. Der Verlauf der Preispfade ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Preispfade sind nach der Höhe des durchschnittlichen Preises während des Betrachtungszeitraums sortiert. Der Farbton in Abbildung 2 wird dabei heller, je höher der durchschnittliche CO₂-Preis liegt. Die nominellen Werte pro Periode sind in Tabelle 1 dargestellt.

Zum einen soll betrachtet werden, ob die implementierten CO₂-Preise die Emissionen im Ziel-Jahr 2045 ausreichend senken konnten. Zum anderen werden auch die kumulierten CO₂-Emissionen betrachtet, da das Referenzszenario zwar das Ziel der Klimaneutralität erreicht, der kostenoptimale Pfad jedoch mittelfristig noch erhebliche CO₂-Emissionen verursacht. Deswegen wird als weitere Referenz das deutsche Klimaschutzgesetz gewählt. Da darin lediglich Werte bis 2030 festgelegt sind, werden die Werte bis 2045 etabliert, die Zielmarke sind dabei die verbleibenden Restemissionen aus dem bisherigen Referenzszenario.

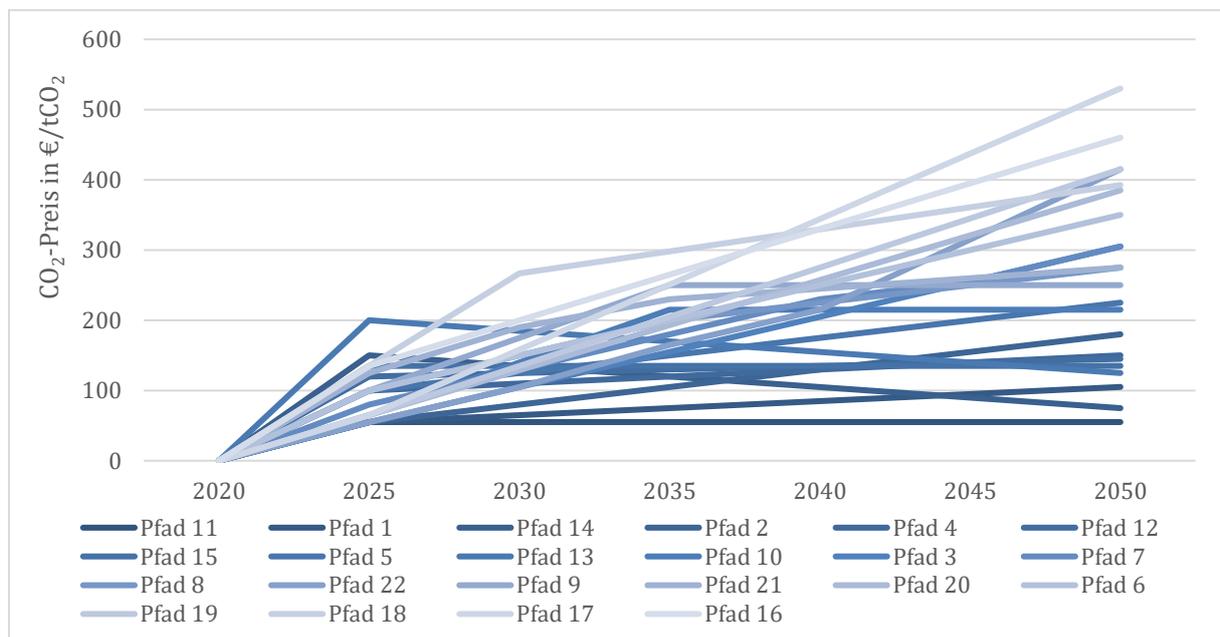


Abbildung 2: Betrachtete CO₂-Preispfade

€/t CO ₂	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	Durchschnitt
Pfad 11	0	55	55	55	55	55	55	55,0
Pfad 1	0	55	65	75	85	95	105	80,0
Pfad 14	0	150	135	120	105	90	75	112,5
Pfad 2	0	55	80	105	130	155	180	117,5
Pfad 4	0	100	110	120	130	140	150	125,0
Pfad 12	0	120	125	130	135	140	145	132,5
Pfad 15	0	135	135	135	135	135	135	135,0
Pfad 5	0	100	125	150	175	200	225	162,5

Pfad 13	0	200	185	170	155	140	125	162,5
Pfad 10	0	65	140	215	215	215	215	177,5
Pfad 3	0	55	105	155	205	255	305	180,0
Pfad 7	0	80	130	180	230	255	305	196,7
Pfad 8	0	100	150	200	225	250	275	200,0
Pfad 22	0	55	105	165	215	315	415	211,7
Pfad 9	0	100	175	250	250	250	250	212,5
Pfad 21	0	125	190	230	245	260	275	220,8
Pfad 20	0	65	129	193	257	321	385	225,0
Pfad 6	0	100	150	200	250	300	350	225,0
Pfad 19	0	65	135	205	275	345	415	240,0
Pfad 18	0	135	266,5	298	329,5	361	392,5	297,1
Pfad 17	0	65	158	251	344	437	530	297,5
Pfad 16	0	135	200	265	330	395	460	297,5

Tabelle 1: CO₂-Preise je Periode für die betrachteten CO₂-Preispfade, geordnet nach dem durchschnittlichen CO₂-Preis

3 Ergebnisse

Für den Gebäudesektor erreichen lediglich die drei CO₂-Preispfade mit den höchsten durchschnittlichen Preisen (Pfad 16, 17 und 18) das kumulierte Emissionsziel für den gesamten Betrachtungszeitraum (2010-2050) von maximal 3265 Mt CO₂ des Referenzszenarios. Diese Szenarien sind auch die einzigen, die 2045 geringere Emissionen als das Referenzszenario aufweisen. Auffällig ist, dass keines der Szenarien das Ziel für 2025 erreicht. Dabei liegen die Preise für einige Preispfade bereits 2025 bei 135 €/t CO₂. Jedoch erreichen immerhin 7 Preispfade das Ziel für 2030 und 12 das Ziel für 2040. Die Ergebnisse für die jeweiligen Preispfade für den Gebäudesektor sind in Abbildung 3 dargestellt.

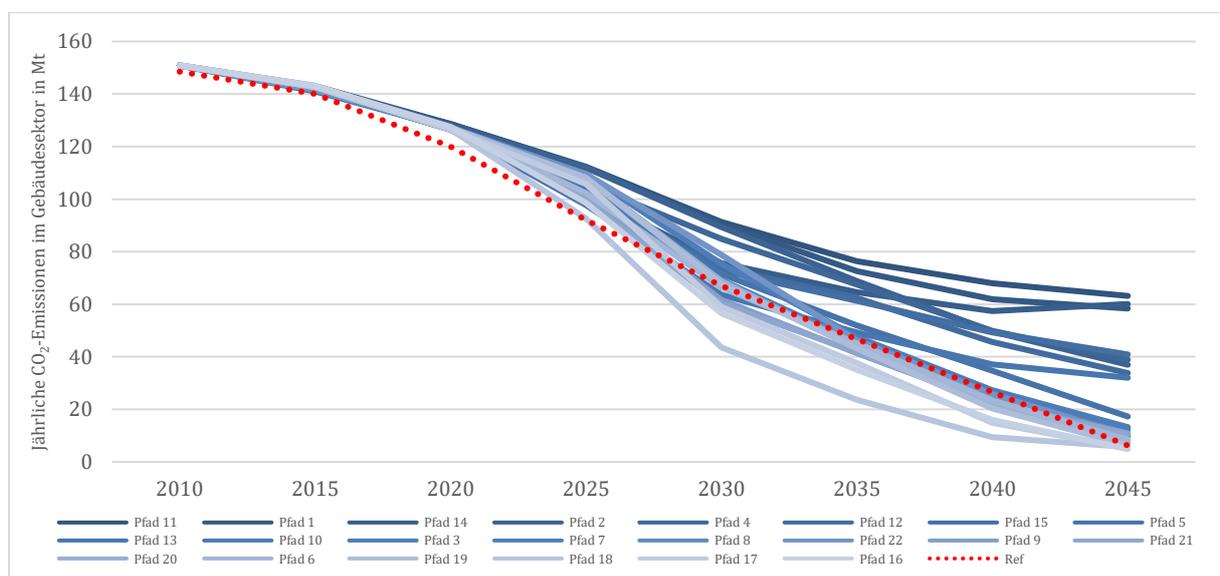


Abbildung 3: CO₂-Emissionen im Gebäudesektor pro Jahr, Vergleich mit dem Referenzszenario (Ref)

Dies deutet darauf hin, dass kurzfristige Emissionsminderungen (2025) im Gebäudesektor nur sehr schwer mit dem Instrument der CO₂-Bepreisung zu erreichen sind. Unter stark steigenden CO₂-Preispfaden ist es möglich, mittelfristig (2030-2040) sogar besser als das Referenzszenario abzuschneiden. Langfristig (2045-2050) sind sehr hohe CO₂-Preise notwendig, um die notwendige vollständige Dekarbonisierung zu erreichen, die für die Klimaneutralität essenziell ist.

Die Hauptlast der CO₂-Emissionen und damit auch der Emissionsminderung im Gebäudesektor tragen die Bereitstellung von Raumwärme und Brauchwarmwasser. Der Endenergieverbrauch hierfür ist für den Preispfad 16 in Abbildung 4 dargestellt. Hierbei ist zu sehen, dass für die hohen Preise, die für Pfad 16 hinterlegt sind, Wärmepumpen (Strom + Umweltwärme – Luft/Wasser bzw. Oberfl. Geothermie Wasser/Wasser), Fernwärme und Biomasse den Großteil des Endenergieverbrauchs 2045 ausmachen. Zudem sieht man, dass ein kleiner Rest an fossilem Erdgas auch 2045 im Energiesystem verbleibt. Gleichzeitig wird durch die hohen CO₂-Preise der Erdölverbrauch sehr schnell unwirtschaftlich.

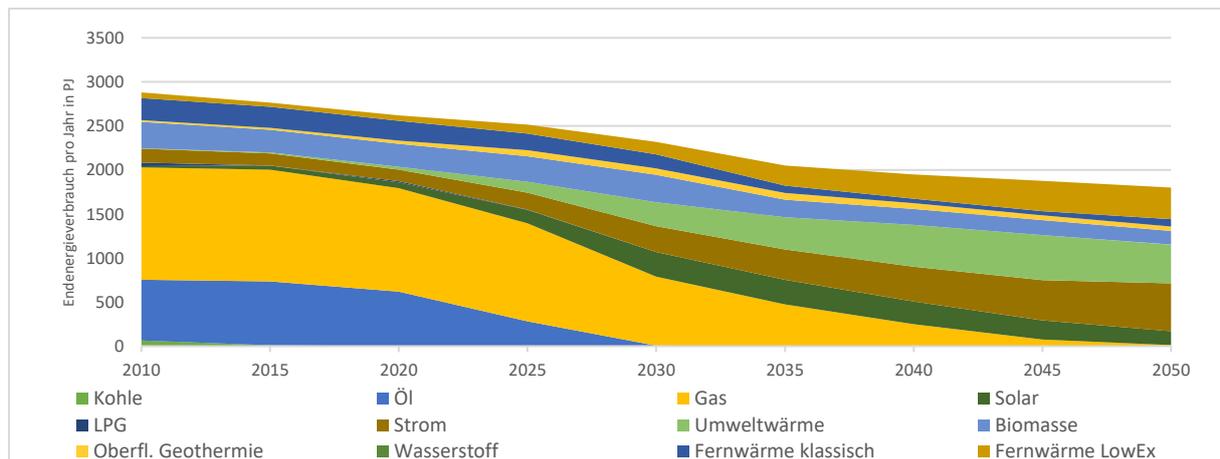


Abbildung 4: Endenergieverbrauch des Gebäudesektors in Deutschland pro Jahr in PJ, Pfad 16

Dabei reduziert jede Form der CO₂-Bepreisung den Ölverbrauch gegenüber dem Referenzlauf signifikant. Dabei ist hier insbesondere die Zeit von 2025-2035 relevant. Dort sieht man, dass die CO₂-Bepreisung einen deutlichen Effekt auf den Ölverbrauch hat (vgl. Abbildung 5)

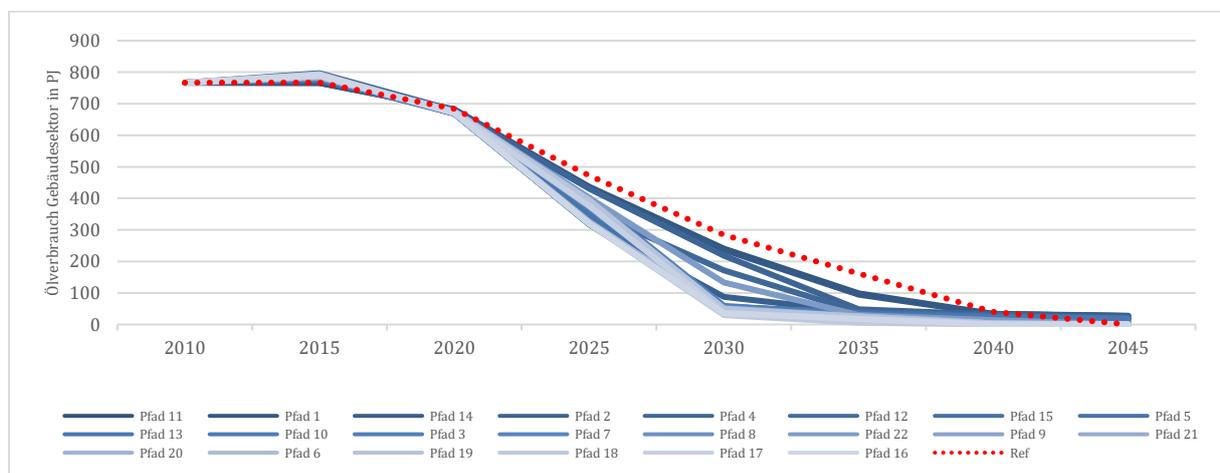


Abbildung 5: Endenergieverbrauch Erdöl im Gebäudesektor pro Jahr für die untersuchten CO₂-Preispfade

Der Verbrauch von Öl wird jedoch nicht ausschließlich durch CO₂-neutrale Energieträger substituiert. So setzen insbesondere die Szenarien mit mittelfristig niedrigen CO₂-Preisen vermehrt auf Erdgas. Der Endenergieverbrauch der Gebäude, der durch Erdgas abgedeckt wird, ist in Abbildung 6 dargestellt.

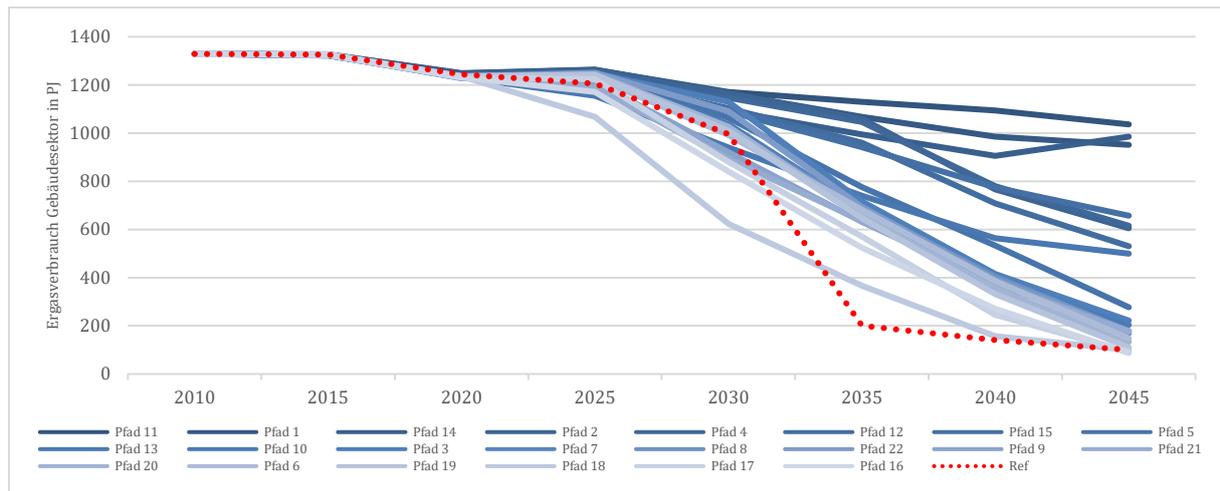


Abbildung 6: Endenergieverbrauch Erdgas im Gebäudesektor pro Jahr für die untersuchten CO₂-Preispfade

Ermittelt das Modell im Referenzszenario den kostenoptimalen Pfad zum Erreichen der Klimaneutralität, so erfolgt eine scharfe Abkehr von fossilen Energieträgern wie Öl und Gas im Zeitraum von 2030-2040. Durch eine CO₂-Bepreisung in ausreichender Höhe stellt sich dieser Vorgang deutlich gradueller ein. Allerdings sind moderate und selbst vergleichsweise hohe CO₂-Preise nicht geeignet, um Erdgas vollständig aus dem Energiesystem zu verdrängen.

Eine Sorge, die mit steigenden CO₂-Preisen insbesondere im Gebäudesektor verbunden ist, ist die steigende zusätzliche Belastung von Haushalten mit niedrigem Einkommen. Diese finanzielle Belastung kann modelltechnisch als Summe der bezahlten CO₂-Preise abgebildet werden. Die Modellergebnisse zeigen, dass steigende CO₂-Preise in der Tat kurzfristig eine zusätzliche finanzielle Belastung darstellen. Allerdings führen höhere CO₂-Preise auch zu Emissionsminderungen, so dass sich insbesondere über den gesamten Betrachtungszeitraum ein Maximum an finanzieller Belastung einstellt. Insbesondere der zeitliche Verlauf des CO₂-Preispfades stellt einen wichtigen Einflussfaktor für die Belastung dar. Die höchste Belastung wird für Preispfade registriert, die zwar früh ansteigen, dann aber nicht weiter steigen und so keine zusätzlichen CO₂-Minderungen anregen. Über den gesamten Betrachtungszeitraum lässt sich keine signifikante Korrelation zwischen der finanziellen Belastung und der Höhe des durchschnittlichen CO₂-Preises feststellen. Allerdings gibt es zeitweise eine starke Korrelation zwischen der Rate des Anstieges des CO₂-Preises und der finanziellen Belastung. Für beinahe alle Szenarien liegt die Belastung im Zeitraum 2020-2030 jedoch am höchsten.

Im Rahmen der Energiesystemanalyse lässt sich damit schlussfolgern, dass die Vermeidung von Preissprüngen sowie ein kontinuierlich steigender CO₂-Preis dazu geeignet sind, die finanzielle Belastung durch die CO₂-Bepreisung im Gebäudesektor zu minimieren. Dies wird deutlich, wenn zum Beispiel Pfad 3 mit Pfad 10 verglichen wird. Beide haben nahezu identische durchschnittliche CO₂-Preise, jedoch einen unterschiedlichen Verlauf.

So startet Pfad 10 mit 65 €/t CO₂ im Jahr 2025 und erreicht dann von 2035 bis 2050 ein Plateau von 215 €/t CO₂. Pfad 3 hingegen steigt linear von 55 €/t CO₂ im Jahr 2025 bis 305 €/t CO₂ in 2050. Durch den frühzeitig hohen CO₂-Preis reduzieren sich die CO₂-Emissionen für Pfad 10 um 1,5% mehr als für Pfad 3. Jedoch steigt die Summe der gezahlten CO₂-Preise um 12% an. Betrachtet man nur die ersten beiden Perioden nach Einführung der CO₂-Bepreisung (2025-2030), so steigt die finanzielle Belastung sogar um circa 20%. Diese Entwicklung lässt sich

konsistent für CO₂-Preispfade mit ähnlichen durchschnittlichen Preisen, aber unterschiedlichem Verlauf beobachten.

Für den Verkehrssektor zeichnet sich ein anderes Bild. 12 der 22 Szenarien erreichen kumuliert weniger Emissionen als der Referenzlauf. Jedoch erreicht keines der Szenarien das Ziel für 2045 (vgl. Abbildung 7). Auch hier zeigt sich, dass eine vollständige Dekarbonisierung nicht durch die CO₂-Bepreisung mit den untersuchten Preispfaden erreicht werden kann. Kurzfristig (2025) erreicht ebenfalls keiner der Preispfade weniger Emissionen als der Referenzlauf. Mittelfristig (2030 bis 2040) erreicht eine Mehrzahl der Szenarien jedoch eine stärkere Emissionsminderung.

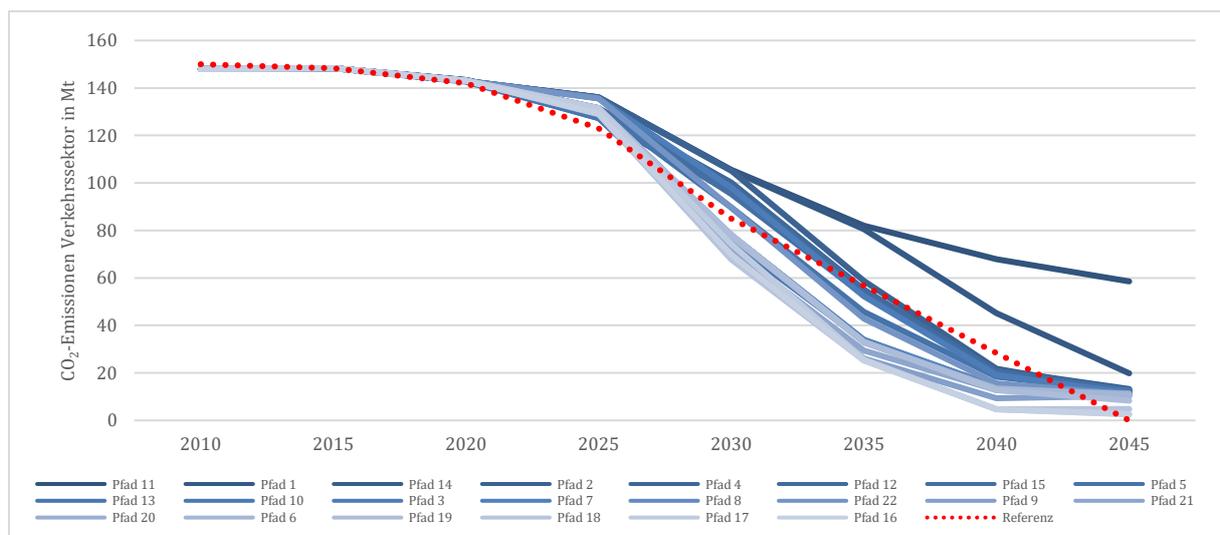


Abbildung 7: Jährliche CO₂-Emissionen im Verkehrssektor (ohne Schifffahrt und Flugverkehr)

Die Modellanalysen ergaben, dass PKWs deutlich schneller dekarbonisieren als andere Verkehrsbereiche. Bereits ab relativ moderaten CO₂-Preisen von circa 100 €/t CO₂ in 2030 sind (nahezu) alle Neuzulassungen ab 2030 vollständig elektrisch. Dementsprechend unterscheiden sich die CO₂-Emissionen der PKWs für die untersuchten CO₂-Preispfade nur geringfügig, die meisten Szenarien reduzieren die Emissionen mittelfristig sogar deutlich schneller als im Referenzszenario. Im Modell wird angenommen, dass E-Autos ab den späten 2020er-Jahren Kostenparität bezüglich der Investitionskosten mit Verbrennern erreichen werden.

Dies gilt jedoch nicht für den Güterverkehr auf der Straße (LKWs). Hier ist es für das Modell erheblich schwerer, eine tiefe Dekarbonisierung zu erreichen. Tatsächlich ist es mit sehr hohen CO₂-Preisen möglich, mittelfristig die Ziele aus dem Referenzlauf zu übererfüllen. Jedoch verbleibt ein gewisses Restniveau an Emissionen, das von den implementierten CO₂-Preispfaden nicht vollständig aus dem Modell gedrängt werden konnte, wie in Abbildung 8 dargestellt. Der Grund hierfür sind hauptsächlich elektrische LKW mit Range Extender. Hierbei verbleibt ein Restbestandteil an CO₂-Emissionen, der innerhalb des betrachteten Zeitraums selbst bei sehr hohen CO₂-Preisen nicht vollständig substituiert wird.

Zudem sieht man im Verkehrssektor, im Gegensatz zum Gebäudesektor, dass frühzeitig hohe CO₂-Preise eine deutlich stärkere Wirkung entfalten. So fällt auf, dass Preispfade, die von einem niedrigen Niveau aus kontinuierlich steigen, insbesondere im Lastverkehr deutlich

höhere Emissionen bedingen als solche, die schon ab 2030 hohe Preise aufweisen. Dies sieht man deutlich an den Pfaden 3 und 22, die zwar einen hohen durchschnittlichen Preis haben, 2030 jedoch noch einen vergleichsweise niedrigen Preis von 105 €/t CO₂ in 2030 aufweisen.

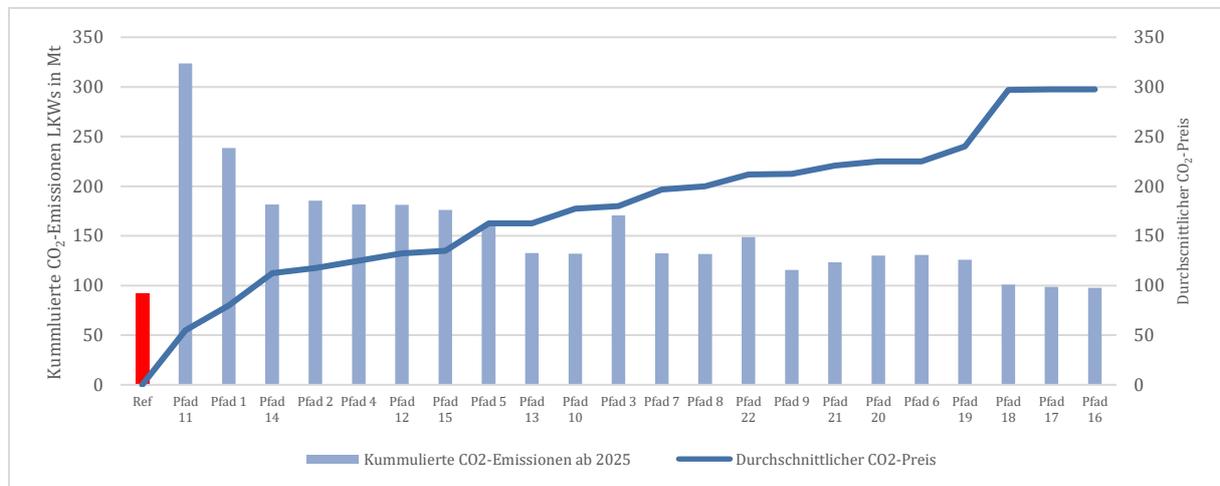


Abbildung 8: Kumulierte CO₂-Emissionen des Güterverkehr LKW (Primärachse), verglichen mit dem durchschnittlichen CO₂-Preis (Sekundärachse)

Ähnlich wie für den Gebäudesektor zeigt sich auch im Verkehrssektor, dass es hinsichtlich der finanziellen Belastung durch die CO₂-Bepreisung ein Maximum über alle Preispfade hinweg gibt. Für den Gebäudesektor liegt dieses Maximum der gezahlten CO₂-Preise bei 19,5 Mrd. € pro Jahr, für den Verkehrssektor bei 25,5 Mrd. € pro Jahr.

Allerdings bietet ein frühzeitig hoher Preis im Verkehrssektor durchaus Vorteile. So können hier mit frühzeitig hohen CO₂-Preisen nicht nur die Emissionen stärker gesenkt werden, sondern auch die finanzielle Belastung. Für das Beispiel der beiden Preispfade 3 und 10 ergibt sich somit in diesem Sektor ein anderes Bild: Nicht nur, dass die Emissionen für Pfad 3 über den gesamten Betrachtungszeitraum 6,6 % höher liegen als für Pfad 10, auch die finanzielle Belastung ist um etwa 0,6% höher.

4 Diskussion und Ausblick

Zum derzeitigen Zeitpunkt ist es unwahrscheinlich, dass Deutschland seine Klimaziele ausschließlich mittels des Instruments der CO₂-Bepreisung zu erreichen versucht. Dennoch lassen sich aus den durchgeführten Modellrechnungen wertvolle Erkenntnisse ableiten. Zum ersten zeigt sich, dass kurzfristige (bis 2025) CO₂-Reduktionen sowohl im Gebäude- als auch im Verkehrssektor tendenziell gering ausfallen. Dies liegt zum einen daran, dass die gewählten CO₂-Preispfade nahezu alle mit der Zeit steigen, die Preise sind also 2025 nicht sehr hoch. Zum anderen haben sowohl im Verkehrssektor als auch im Gebäudesektor die Technologien längere Lebensdauern. Somit fällt ein Großteil der erzeugten CO₂-Emissionen im Jahr 2025 auf Investitionsentscheidungen zurück, die getätigt wurden, bevor die CO₂-Bepreisung eingeführt wurde.

Eine tiefe Dekarbonisierung, die eine vollständige Substituierung von fossilen Brennstoffen bedingt, kann nur mit sehr hohen CO₂-Preisen erreicht werden. Keiner der untersuchten CO₂-Preispfade hat diese tiefe Dekarbonisierung vollständig erreicht. Mittelfristig (2030-2040)

führen ausreichend hohe CO₂-Preise jedoch in beiden Sektoren sogar zu einer Übererfüllung der Ziele. Das heißt, es bedarf sowohl kurz- als auch langfristig einer Ergänzung der CO₂-Bepreisung durch andere Politikinstrumente.

Zum anderen zeigt sich, dass die beiden untersuchten Sektoren jeweils eigene Anforderungen an die CO₂-Bepreisung haben. So ist zum Beispiel im Gebäudesektor ein von dem derzeit anvisierten Preisniveau kontinuierlich steigender Preispfad mit einer geringeren finanziellen Belastung verbunden, als Pfade mit frühzeitig hohen Preisen, Preisplateaus oder starken Preissprüngen. Im Verkehrssektor führen frühzeitig hohe CO₂-Preise jedoch zu vergleichsweise stärkeren Emissionsminderungen und die finanzielle Belastung über den gesamten Betrachtungszeitraum sinkt dadurch (leicht).

Selbstverständlich lassen sich diese Ergebnisse nicht vollständig in die Realität übertragen. Es gibt diverse Einflussfaktoren auf den Erfolg der CO₂-Bepreisung, die modelltechnisch nicht abgebildet werden können. Das Modell unterstellt zum Beispiel ein rationelles Verhalten und kostenoptimale Entscheidungen der Akteure. Jedoch kommt es sowohl im Gebäudesektor als auch im Verkehrssektor nicht immer zu rationalen, kostenoptimalen Entscheidungen, die in der Mehrzahl von privaten Akteuren getroffen werden. So gibt es zum Beispiel Vorurteile und Bedenken gegenüber Wärmepumpen [11] oder Elektroautos [15]. Zudem sind private Akteure oft nicht über alle Finanzierungs- und Fördermöglichkeiten, insbesondere im Gebäudesektor, informiert. [16]

Ein weiteres Hemmnis ist die finanzielle Situation der Akteure, die im Modell nicht einfließt. So fällt es manchen Entscheidungsträger*innen schwer, finanzielle Mittel für Investitionen in klimafreundliche Technologien wie Effizienzmaßnahmen, Wärmepumpen oder Elektroautos aufzubringen, selbst wenn diese über die gesamte Lebensdauer betrachtet, kosteneffizienter sind. Im Gebäudebereich stellt das Mieter-Vermieter-Dilemma ein spezifisches Hemmnis dar. [16] Im Verkehrssektor stellen Sorgen über die Reichweite von E-Autos und eine adäquate Ladeinfrastruktur Hemmnisse dar.

Das TIMES PanEu Modell wird in der Regel unter perfekter Voraussicht gelöst, das heißt, das Modell kennt die Entwicklung von Nachfrage, Preisen, verfügbaren Technologien und politischen Rahmenbedingungen zu jedem Zeitpunkt und ermittelt das intertemporale Optimum. In der realen Welt liegen Akteuren jedoch fast nie vollständige Informationen vor. Dies trifft umso mehr auf private Akteure zu, die in den beiden untersuchten Sektoren jedoch viele der Entscheidungen treffen. Das Gegenteil zu perfekter Voraussicht wäre ein myopischer Ansatz, bei dem das Modell nur Kenntnis über die Entwicklung von beispielsweise ein oder zwei Perioden hat (das sog. Myopische Fenster). Der Unterschied zwischen perfekter Voraussicht und Myopik ist besonders relevant, wenn äußere Umstände sich rasch ändern, zum Beispiel in Form von sich verändernden CO₂-Preisen. Von daher sollte man beachten, dass die Berechnung unter perfekter Voraussicht bestimmten Limitationen unterliegt, und dass die notwendigen CO₂-Preise möglicherweise gegenüber dem myopischen Ansatz unterschätzt werden. Dies bekräftigt, dass die Klimaneutralität alleine über das Instrument der CO₂-Bepreisung möglicherweise nicht vollständig erreicht werden kann.

Danksagung:

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung beim Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) im Rahmen Verbundvorhaben: CO₂-Preis – Analyse der kurz- und langfristigen Wirkungen unterschiedlicher CO₂-Bepreisungs-Varianten auf Gesellschaft und Volkswirtschaft; Teilvorhaben: Koordination, Makro- und Systemanalysen (Förderkennzeichen: 03EI5213A)

5 Literaturverzeichnis

- [1] G. Luderer, C. Kost, and D. Sörgel, “Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 - Szenarien und Pfade im Modellvergleich,” Potsdam, 2021.
- [2] Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut, Ed., “Klimaneutrales Deutschland 2045: Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann,” Zusammenfassung im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende, 2021.
- [3] S. Braungardt, V. Bürger, and B. Köhler, “Carbon Pricing and Complementary Policies— Consistency of the Policy Mix for Decarbonizing Buildings in Germany,” *Energies*, vol. 14, no. 21, p. 7143, 2021, doi: 10.3390/en14217143.
- [4] M. Thöne, M. Gierkink, L. Pickert, H. Kreuter, and H. Decker, “CO₂-Bepreisung im Gebäudesektor und notwendige Zusatzinstrumente,” 2019.
- [5] World Bank, *State and Trends of Carbon Pricing 2021*. Washington, DC: World Bank, 2021. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10986/35620>
- [6] R. C. Pietzcker *et al.*, “Notwendige CO₂-Preise zum Erreichen des europäischen Klimaziels 2030,” Potsdam, Nov. 2021.
- [7] F. Kattelman, J. Siegle, R. Cunha Montenegro, V. Sehn, M. Blesl, and U. Fahl, “How to Reach the New Green Deal Targets: Analysing the Necessary Burden Sharing within the EU Using a Multi-Model Approach,” *Energies*, vol. 14, no. 23, p. 7971, 2021, doi: 10.3390/en14237971.
- [8] C. Kemfert, S. Schmalz, and N. Wägner, “CO₂-Steuer oder Ausweitung des Emissionshandels: Wie sich die Klimaziele besser erreichen lassen,” *DIW aktuell*, no. 20, 2019.
- [9] J. E. Aldy and S. Armitage, “Cost-Effectiveness Implications of Carbon Price Certainty,” *AEA Papers and Proceedings*, vol. 110, pp. 113–118, 2020, doi: 10.1257/pandp.20201083.
- [10] O. Edenhofer and C. Flachsland, “Eckpunkte einer CO₂-Preisreform für Deutschland,” *MCC Working paper*, no. 1, 2018.
- [11] J. Berneiser *et al.*, “Maßnahmen und Instrumente für eine ambitionierte, klimafreundliche und sozialverträgliche Wärmewende im Gebäudesektor_August2021: Teil 1: Analyse der Herausforderungen und Instrumente im Gebäudesektor,” Potsdam, Aug. 2021.
- [12] P. Korkmaz, R. Cunha Montenegro, D. Schmid, M. Blesl, and U. Fahl, “On the Way to a Sustainable European Energy System: Setting Up an Integrated Assessment Toolbox with TIMES PanEU as the Key Component,” *Energies*, vol. 13, no. 3, p. 707, 2020, doi: 10.3390/en13030707.

- [13] M. Blesl, "Kraft-Wärme-Kopplung im Wärmemarkt Deutschlands und Europas - eine Energiesystem- und Technikanalyse," Habilitationsschrift, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Stuttgart, 2014.
- [14] IEA, International Energy Agency, Ed., "World Energy Outlook 2021," 2021.
- [15] E. Tvinnereim and M. Mehling, "Carbon pricing and deep decarbonisation," *Energy Policy*, vol. 121, no. 1, pp. 185–189, 2018, doi: 10.1016/j.enpol.2018.06.020.
- [16] S. Maerz, "Private Kleinvermieter - Ein vergessener Akteur auf dem Weg zur Waermewende?!", *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, vol. 68, no. 3, pp. 17–21, 2018.