



Deep Transformation Scenarios
for Informing the Climate Policy Discourse

Wege zur Treibhausgasneutralität bis 2050

*Der Einfluss von Politik, Technologie und Verhalten
auf eine erfolgreiche Transformation*

JANUAR 2022

Impressum

Dieser Bericht ist im Forschungsvorhaben DIPOL erstellt worden, das im Rahmen der BMBF-Fördermaßnahme Ökonomie des Klimawandels II von 2018 – 2022 gefördert wurde, um lösungsorientiertes Wissen im Bereich der Klimaökonomie zur Begrenzung der globalen Erwärmung bereitzustellen. Zur Unterstützung des Wissenstransfers und zur Intensivierung des Austauschs zwischen Wissenschaftlern und Praktikern wurden die geförderten Projekte durch den „Dialog zur Klimaökonomie“ unterstützt.

Weitere Informationen: <http://dipol-project.org>

Zitiervorschlag:

Jessica Strefler, Nico Bauer, Kathrin Kaestner, Elmar Kriegler, Leon Merfort, Annekathrin Schoofs, Miodrag Stevanovic, Dennis Tänzler, Colin Vance, Florian Wintermeyer, Emily Wright, 2022: Wege zur Treibhausgasneutralität bis 2050. Der Einfluss von Politik, Technologie und Verhalten auf eine erfolgreiche Transformation. Potsdam, Essen, Berlin: Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, RWI Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung und adelphi.

Herausgebende Institutionen:

adelphi research gemeinnützige GmbH
Alt-Moabit 91
10559 Berlin
www.adelphi.de

Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) e.V.
Telegrafenberg A 31
14473 Potsdam
www.pik-potsdam.de

RWI – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung
Hohenzollernstraße 1-3
45128 Essen
www.rwi-essen.de

Gestaltung:

www.undstoffers.de

Stand:

Januar 2022



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Inhalt

Executive Summary	4
1. Einleitung	8
2. Szenarien	9
3. Einfluss der Technologieverfügbarkeit auf die Transformation	12
4. Einfluss der politischen Koordination auf die Transformation	14
5. Einfluss von Verhaltensänderung auf die Transformation	16
6. Verteilungswirkungen	18
6.1 Verteilungseffekte eines CO ₂ -Preises	18
6.2 Kraftstoffkosten und Luftqualität	21
6.3 Subventionen für die Ladeinfrastruktur und die Zulassung von Elektrofahrzeugen	22
7. Synthese und Handlungsbedarf	24
7.1 Synthese	24
7.2 Politischer Handlungsbedarf	27
Annex	29
Referenzen	37

Executive Summary

Emissionsneutrale Transformationspfade effizient und sozial gerecht gestalten: Zur Bewältigung der Klimakrise und zur Umsetzung des Pariser Klimaschutzabkommens hat sich die Europäische Union zum Ziel gesetzt, die Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) bis 2050 auf Netto-Null zu senken. Mit dem nationalen Klimaschutzplan sucht auch Deutschland den Regulierungsrahmen so zu setzen, dass im Jahr 2045 Netto-Null-THG-Emissionen erreicht werden. Während über das Ziel weitgehende Einigkeit besteht, ist der Weg dorthin noch umstritten.

Szenarien gemeinsam mit zentralen gesellschaftlichen Stakeholdern entwickeln: Im Rahmen des Projekts „Deep Transformation Scenarios for Informing the Climate Policy Discourse“ (DIPOL) haben das PIK, RWI und adelphi mit Akteuren aus Wirtschaft, Wissenschaft und Zivilgesellschaft zusammengearbeitet, um eine Reihe von Szenario-Narrativen zu entwickeln, die die Perspektiven dieser Stakeholder zur Erreichung der deutschen und europäischen Klimaziele verbinden und so eine Reihe möglicher Entwicklungspfade für Europa und Deutschland aufzeigen. Ausgewählte Stakeholder wurden hierzu über drei Jahre kontinuierlich in die Szenario-Entwicklung einbezogen und auf diese Weise ein Co-Produktionsprozess etabliert.

Fünf Szenario-Narrative

Das unterschiedliche Zusammenspiel der Transformationsdimensionen ergibt folgende fünf Szenario-Narrative:

- 1. Politiksteuernder Ansatz:** Ein breites Spektrum von Klimaschutztechnologien ist verfügbar. Sozial akzeptiert und politisch zugelassen werden allerdings nur solche Technologien, die als ökologisch und sozial nachhaltig gelten. Die Politik verfolgt eine Kombination aus THG-Preis und sektorspezifischen Politiken.
- 2. Verhaltensorientierter Ansatz:** Ein breites Spektrum von Klimaschutztechnologien ist verfügbar. Sozial akzeptiert und politisch zugelassen werden allerdings nur Technologien, die als ökologisch und sozial nachhaltig gelten. Die Politik verfolgt eine Kombination aus THG-Preis, sektorspezifischen Politiken und Appelle zur Verhaltensänderung. Im Gegensatz zu allen anderen Szenarien bemühen sich die Menschen in diesem Szenario, ihren individuellen Beitrag zu leisten, indem sie auf einen kohlenstoffarmen und nachhaltigen Konsum von Gütern und Dienstleistungen achten.
- 3. Technologieorientierter Ansatz:** Ein breites Spektrum von Klimaschutztechnologien ist verfügbar und sozial akzeptiert. Die Politik verfolgt eine Kombination aus THG-Preis und sektorspezifische Politiken.
- 4. Akzeptanzorientierter Ansatz:** Ein breites Spektrum von Klimaschutztechnologien ist verfügbar. Sozial akzeptiert und politisch zugelassen werden allerdings nur solche Technologien, die als ökologisch und sozial nachhaltig gelten. Die Politik strebt das Klimaziel mittels eines sektorübergreifenden einheitlichen hohen THG-Preises an.
- 5. Marktwirtschaftlich orientierter Ansatz:** Ein breites Spektrum von Klimaschutztechnologien ist technologisch verfügbar und sozial akzeptiert. Die Politik strebt das Klimaziel mittels eines sektorübergreifenden einheitlichen hohen THG-Preises an.

	Technologie & Innovation	Politische Koordination	Verhaltensänderung
Politiksteuernder Ansatz	Fokus Technologieakzeptanz	Sektororientiert	Preisorientiert
Verhaltensorientierter Ansatz	Fokus Technologieakzeptanz	Sektororientiert	Wertorientiert
Technologieorientierter Ansatz	Fokus THG-Minderung	Sektororientiert	Preisorientiert
Akzeptanzorientierter Ansatz	Fokus Technologieakzeptanz	Marktorientiert	Preisorientiert
Marktwirtschaftlich orientierter Ansatz	Fokus THG-Minderung	Marktorientiert	Preisorientiert

Hebel und Hürden der Transformation erkennen und nutzen. Diese Zusammenarbeit zur Szenario-Entwicklung resultiert in fünf verschiedenen Szenario-Narrativen, die sich entlang einer Reihe von Hebeln und Hürden einerseits und drei zentralen Dimensionen der Transformation andererseits ausgestalten: „Technologie und Innovation“, „Politische Koordination“ und „Verhaltensänderung“:

- Die Dimension „**Technologie und Innovation**“ beschreibt die Auswirkungen von Einschränkungen bestimmter Technologien mit mangelnder oder eingeschränkter gesellschaftlicher Akzeptanz, wie Carbon Capture and Storage (CCS), Bioenergie, Windenergie, oder Kernkraft.
- „**Politische Koordination**“ untersucht die Unterschiede zwischen einem marktwirtschaftlichen Ansatz, der sich hauptsächlich auf die THG-Bepreisung stützt, und einem sektororientierten Ansatz, der eine Kombination aus THG-Preis und gezielten unterstützenden Sektorpolitiken wie Subventionen für Elektroautos, Präzisionslandwirtschaft oder Wasserstoffproduktion, aber auch Verboten von Ölheizungen oder Neuzulassungen von Verbrennern verfolgt.
- Die Dimension „**Verhaltensänderung**“ zeigt, was eine Veränderung des Lebensstils hin zu geringerer Energienachfrage und veränderten Ernährungsgewohnheiten bewirkt.

Die Kombination der verschiedenen Ausprägungen der drei Dimensionen hat zu 5 Szenario-Narrativen geführt, aus denen die folgenden Erkenntnisse abgeleitet werden.

Zentrale übergeordnete Erkenntnisse für Europa aus den Szenarien-Berechnungen sind:

- **Übererfüllung der -55 %-Zielvorgabe:** In alle fünf Szenarien wird das 2030-Ziel deutlich übererfüllt, die THG-Reduktion liegt bei -59 bis -63%. Eine bedeutende Rolle für eine erfolgreiche Umsetzung der Transformationspfade spielen die **öffentliche Akzeptanz und damit einhergehende Gerechtigkeitsaspekte und Verteilungswirkungen** von Klimaschutzmaßnahmen.
- **CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre ist für THG-Neutralität erforderlich.** Der Bedarf kann durch stärkere Elektrifizierung und einen nachhaltigeren Lebensstil von über 1.000 Mt CO₂/a auf die Hälfte reduziert werden.
- **CO₂-Preise von über 100 €/t CO₂ in 2030** sind in allen Szenarien nötig, um das Klimaziel zu erreichen: Der benötigte CO₂-Preis kann durch das Zulassen von Technologien mit mangelnder sozialer Akzeptanz wie CCS, durch politisch teilweise als unliebsamen empfundene ordnungspolitische Maßnahmen wie ein Verbot von Verbrennern und Öl- und Gasheizungen, oder durch eine Änderung des Konsumverhaltens hin zu einem nachhaltigeren Lebensstil reduziert werden. Falls nichts davon eintritt werden sehr hohe CO₂-Preise von über 450 €/t CO₂ bereits im Jahr 2030 benötigt.

- **Eine Rückverteilung der Einnahmen aus der CO₂-Bepreisung durch eine Pro-Kopf-Pauschale in Deutschland kann die stärkere Belastung einkommenschwacher und großer Haushalte ausgleichen:** Während bei einem CO₂-Preis von 57 €/t CO₂ im Jahr 2025 die durchschnittlichen Kosten für einen Haushalt pro Jahr bei ca. 700 € liegen, lassen sie sich beim höchsten betrachteten Preis von 230 €/t CO₂ bei 2.180 € pro Jahr verorten. Die **Kostenbelastungen für Haushalte auf dem Land und Haushalte in der Stadt** fallen – absolut und relativ – **ähnlich** aus, da die Emissionen dort jeweils bei ca. 13,6 Tonnen CO₂ pro Haushalt liegen.
- **Sektorpolitiken können die Abhängigkeit von Öl- und Gasimporten reduzieren.** Dies wird durch eine schnellere und ambitioniertere Elektrifizierung erreicht, die bis 2030 eine Erhöhung des Ausbaus von Windenergie um den Faktor 5 – 6 und von Solarenergie um den Faktor 10 – 12 erfordert.
- **Die CO₂-Bepreisung trägt nicht nur zum Klimaschutz bei, sondern kann auch die lokale Luftqualität** insbesondere in städtischen Gebieten verbessern. Höhere CO₂-Preise verringern die Pkw-Nutzung und somit insbesondere die Häufigkeit von sogenannten Kaltstarts, die eine wichtige Quelle gesundheitsschädlicher Schadstoffe wie Stickoxide sind.

Bei der Ausdifferenzierung der fünf Szenario-Narrative lassen sich drei Folgerungen festhalten, was die drei Transformationsdimensionen und ihr Zusammenspiel betrifft.

Einfluss (I) Technologieverfügbarkeit: Entnahmelösungen mit Akzeptanzproblem

In den Szenario-Narrativen verdeutlicht sich ein grundlegender Zielkonflikt zwischen der Akzeptanz von Technologien wie CCS und größeren Ackerflächen für Bioenergie auf der einen und einem mehr als doppelt so hohen CO₂-Preis auf der anderen Seite. Dieser Zielkonflikt kann durch gezielte Sektorpolitiken abgemildert werden, da sie den Bedarf an CO₂-Entnahme reduzieren. Denkbar wäre auch der Einsatz von anderen CO₂-Entnahmeoptionen wie z.B. der Erhöhung des Bodenkohlenstoffs oder Pflanzenkohle, wobei hier noch sehr unsicher ist in welchem Umfang diese zur Verfügung stehen werden.

Einfluss (II) politische Koordination: Kopplung von Preissignalen und Sektorpolitiken

Der grundlegende Zielkonflikt zwischen den beiden Ansätzen liegt vor allem bei der gesellschaftlichen Akzeptanz und der politischen Umsetzbarkeit. Ein sehr hoher CO₂-Preis geht mit Verteilungswirkungen einher, die gesellschaftliche Konflikte auslösen können und damit Akzeptanz und Umsetzbarkeit gefährden. Diese Verteilungswirkungen können durch geeignete Rückverteilung der Einnahmen aus dem CO₂-Preis abgemildert oder sogar progressiv gestaltet werden. Es bestehen aber Zweifel in der öffentlichen Wahrnehmung, dass die Politik dies auch umsetzen wird. Gezielte Sektorpolitiken können in den vorliegenden Szenarien den für die Erreichung der Klimaziele nötigen CO₂-Preis deutlich senken, verlangen dafür aber stringente ordnungsrechtliche Maßnahmen wie Verbote, die gesellschaftlich akzeptiert und politisch umgesetzt werden müssen. Zudem können sie ihrerseits mit hohen volkswirtschaftlichen Kosten einhergehen, die in der öffentlichen Diskussion nicht immer transparent dargestellt werden. Gesamtwirtschaftliche Vermeidungskosten können nur dann reduziert werden, wenn zusätzliche Politikmaßnahmen wie die Förderung neuer Technologien oder Technologiestandards bestehendes Marktversagen verringern statt neue Ineffizienzen zu schaffen.

Die Sektorpolitiken können zudem durch eine höhere direkte Elektrifizierung die Restemissionen senken, was den Bedarf an CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre reduziert. Allerdings steigt hierbei die Stromnachfrage stark an, während die Nachfrage nach Flüssigkraftstoffen und Erdgas sinkt. Der Zubau von Windenergie müsste dann in 2030 etwa 4 Mal höher sein als heute, bei der Solarenergie 10 – 11 Mal höher. Ein Vorteil der schnelleren und ambitionierten Elektrifizierung ist jedoch die Verringerung der Abhängigkeit von Erdöl- und Erdgas-Importen.

Einfluss (III): Verhaltensänderungen wirken – vor allem im Landwirtschaftssektor

Eine umfassende Änderung des Lebensstils führt dazu, dass der zur Erreichung des Netto-Null-Ziels erforderliche CO₂-Preis um ein Drittel niedriger ist als im Szenario mit preisorientiertem Ansatz. Auch Verbraucher- und Nahrungsmittelpreise sinken. Der Hauptunterschied bei den Emissionsreduktionen durch Verhaltensänderungen ist das deutlich höhere Potenzial zur Verringerung der Nicht-CO₂-Emissionen aus der landwirtschaftlichen Produktion. Als weitere Zusatznutzen sind positive Effekte

für die Umwelt und die Gesundheit zu erwarten, die mit einer weniger auf Tierprodukte ausgerichteten landwirtschaftlichen Produktion bzw. Ernährung einhergeht. Der geringe Druck auf die Nahrungsmittelsysteme ergibt sich allerdings nur in Kombination mit der Annahme, dass die aus Biomasse erzeugte Energie aufgrund mangelnder gesellschaftlicher Akzeptanz erheblich eingeschränkt wird. Wenn Technologien zur Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre voll unterstützt würden und eine hohe Nachfrage nach Bioenergiepflanzen aus dem landwirtschaftlichen Anbau bestünde, wäre eine solche Landwirtschaft mit geringer Intensität nicht möglich, und es könnten sich neue Zielkonflikte ergeben.

Politischer Handlungsbedarf steigt

Auf der Grundlage der Berechnungen lässt sich folgender politischer Handlungsbedarf festhalten.

- **Preissignale setzen:** Die Lenkungswirkung des CO₂-Preises ist entscheidend für eine effiziente und tiefgreifende Emissionsminderung. Der CO₂-Preis liegt in dieser Studie in 2030 mindestens bei 108 €/t CO₂, kann aber bei begrenzter Technologieverfügbarkeit, ohne flankierende Sektorpolitiken und ohne Änderung des Konsumverhaltens auf über 450 €/t CO₂ ansteigen.
- **Die CO₂-Bepreisung durch Sektorpolitiken unterstützen:** Gezielte ordnungsrechtliche Maßnahmen in Bereichen, die weniger sensibel auf Preissignale reagieren, können den notwendigen CO₂-Preis deutlich senken und gleichzeitig die Planungssicherheit erhöhen. Dabei muss die politische Durchsetzbarkeit dieser Maßnahmen abgewogen werden gegen sehr hohe CO₂-Preise, die mit entsprechenden Verteilungswirkungen einhergehen. Allerdings verursachen ordnungsrechtliche Maßnahmen meist höhere Kosten, die ebenfalls sozial gerecht verteilt werden müssen (Verbot Verbrennungsmotor, fossile Gebäudeheizungen).
- **Infrastruktur schaffen:** Der Umstieg auf erneuerbare Energien und eine stärkere direkte Elektrifizierung erfordern große Investitionen in Infrastruktur wie den Stromnetzausbau, Ladeinfrastruktur für Elektromobilität, Ausbau von Stromspeichern, Netze für den Transport von Wasserstoff und von CO₂, Ausbau des ÖPNV. Mit einer geografisch differenzierten Ausrichtung kann die Politik die Effektivität der Förderung von Ladestationen deutlich verbessern.
- **Europäische Strategie für CO₂-Entnahme erarbeiten:** Um THG-Neutralität zu erreichen ist es erforderlich, die verbleibenden Restemissionen durch die Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre auszugleichen. In dieser Studie sind 600 – 1.000 GtCO₂/Jahr CO₂-Entnahme nötig, um THG-Neutralität zu erreichen, wobei Sektorpolitiken und eine Änderung des Konsumverhaltens zu niedrigeren Bedarfen führen. Neben Forschung bedarf es hier gesetzlichen Rahmenbedingungen, die im Zuge europäischer Kooperation erfolgen muss.
- **Klimafreundliches Konsumverhalten unterstützen:** Veränderte Ernährungsgewohnheiten mit weniger tierischen Produkten und damit einhergehend eine Verringerung des Viehbestands ist die einzige Möglichkeit, verbleibende CH₄- und N₂O-Emissionen und damit die Abhängigkeit von CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre deutlich zu reduzieren. Zudem sinkt der Energiebedarf und damit die Verbraucherpreise, und es ergeben sich positive Effekte auf Umwelt und Gesundheit. Ein solches Konsumverhalten kann durch geeignete Informationen wie z.B. eine Kennzeichnung des CO₂-Fußabdrucks von Produkten unterstützt werden.
- **Transformation sozialverträglich gestalten:** Da eine CO₂-Bepreisung ohne Rückverteilung regressiv wirkt und einkommensschwache Haushalte relativ gesehen stark belastet, ist eine Rückverteilung wichtig, um soziale Härten abzufedern. Eine Pro-Kopf-Pauschale kehrt erfolgreich die regressive Verteilungswirkung in eine progressive Verteilungswirkung um. Dies ist ein Vorteil im Vergleich zu Verboten. Die häufig hervorgehobene ungleiche Kostenbelastung der Landbevölkerung im Vergleich zur städtischen Bevölkerung wird durch diese Analyse nicht bestätigt, daher sind hier keine ergänzenden Entlastungen nötig.

1. Einleitung

Die Europäische Union hat sich zum Ziel gesetzt, die Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) bis 2050 auf Netto-Null zu senken, um die Klimakrise zu bewältigen und die Temperatur bis zum Ende des Jahrhunderts deutlich unter 2°C zu halten, wie es das Pariser Abkommen vorsieht. Mit dem Europäischen Green Deal beabsichtigt die Europäische Kommission, aufeinander abgestimmte Strategien zu entwickeln, um dieses Ziel zu erreichen, indem sie die Wirtschaft (z.B. Industriestrategie, Farm-to-Fork-Strategie, nationale Energie- und Klimapläne usw.), die Gesellschaft (Europäischer Klimapakt) und die politischen Akteure in den Mitgliedstaaten einbezieht. Auch Deutschland erlässt mit dem Maßnahmenbündel des nationalen Klimaschutzplans Gesetze, um im Jahr 2045 Netto-Null-THG-Emissionen zu erreichen.

Stakeholder Prozess

*Bei der Entwicklung des Transformationsrahmens einer „Deep Decarbonisation“ besteht eine besondere Herausforderung darin, Motivationen und Bedürfnisse diverser Stakeholder zu verstehen und so weit wie möglich zu berücksichtigen. Diese Anforderung wurde im Rahmen des Projekts aktiv angegangen und hat maßgeblich zu der Konkretisierung der Szenario-Narrative (s. Abschnitt „Narrative“ in „Szenarien“) beigetragen. Da Zahlen alleine oftmals nicht ausreichen, um die Szenarien greifbar zu machen, wurden zusammen mit den Stakeholdern „Personas“ entwickelt. „Personas“ sind fiktive Repräsentant*innen einer Zielgruppe und verfügen über Ziele und Bedürfnisse. Hierbei ging es nicht darum, einen Durchschnitt der Bevölkerung darzustellen, sondern spezifische Personen, die Muster im Nutzerverhalten deutlich machen. Im Zuge einer interaktiven Diskussion der Szenarien und Zwischenergebnisse wurde dieser Ansatz der Ko-Produktion von Szenario-Narrativen gewählt und unterschiedliche „Personas“ vor dem Hintergrund der in den Szenarien angelegten Transformationen entweder als Befürworter*innen oder Gegner*innen einer solchen Transformation charakterisiert. Beispielsweise konnten für das politiksteuernde Narrativ die Sichtweisen „Klimaschutz hat seinen Preis“ und „Der Standort geht den Bach runter“ als typische antagonistische Haltungen weiter hinsichtlich des spezifischen sozio-kulturellen Hintergrunds ausdifferenziert. Diese erweiterte Perspektive kann dazu beitragen, bei der politischen Ausgestaltung der Transformationspfade stärker auf bestehende Vorbehalte und Motive der Bevölkerung einzugehen. Als zeitlicher Rahmen wurde das Jahr 2030 definiert, von dem rückblickend eine REgnose stattfand, also ein Rückblick aus der Zukunft, der aus dem Jahr 2030 die Entwicklungen aufzeigt, die den Weg bis 2030 charakterisiert haben könnten.*

Während über das Ziel weitgehende Einigkeit besteht, ist der Weg dorthin noch umstritten. Insbesondere der Einsatz bestimmter Technologien wie Kohlenstoffabscheidung und -speicherung (carbon capture and storage, CCS) oder die Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre, die genaue politische Ausgestaltung der Maßnahmen, wie etwa die Austarierung zwischen Preissignalen und ordnungspolitischen Maßnahmen, und die Rolle individueller Konsumententscheidungen werden kontrovers diskutiert. Dabei gilt es, die Transformation nachhaltig und sozialverträglich auszugestalten und regressive Verteilungseffekte in der Gesellschaft auszugleichen. Langfristige Transformationsszenarien, die Interaktionen zwischen den verschiedenen Sektoren und zwischen wirtschaftlichen, politischen, und gesellschaftlichen Prozessen konsistent abbilden, können den Entscheidungsprozess unterstützen, indem sie ökonomische, ökologische und soziale Auswirkungen der verschiedenen Strategien aufzeigen. Von besonderer Bedeutung ist auch, welche gesellschaftlichen Akteure (politische Entscheidungsträger, Unternehmen und Bürger) zur Erreichung des THG-Neutralitätsziels beitragen.

Im Rahmen des Projekts „Deep Transformation Scenarios for Informing the Climate Policy Discourse“ (DIPOL) haben wir mit Akteuren aus Politik, Wirtschaft und Zivilgesellschaft zusammengearbeitet, um eine Reihe von Szenario-Narrativen zu entwickeln, die die Perspektiven von Wissenschaft, Wirtschaft, Zivilgesellschaft und Politik zur Erreichung der deutschen und europäischen Klimaziele verbinden und so eine Reihe möglicher Entwicklungspfade für Europa und Deutschland skizzieren.

2. Szenarien

Zusammen mit Stakeholdern aus Zivilgesellschaft, Wirtschaft und Politik wurden zentrale Stellschrauben auf dem Weg zur THG-Neutralität erarbeitet, die noch großen Unsicherheiten unterliegen und daher durch dezidierte Szenarien besser verstanden werden können. Zu Stellschrauben, die zwar wichtig, aber eher unstrittig sind, wie der Ausbau von Solarenergie oder Stromspeichern, wurden in allen Szenarien gleiche Annahmen getroffen. Unterschiedliche Herangehensweisen an diese noch unsicheren Hebel und Hürden eröffnen eine Vielzahl von möglichen Transformationspfaden. Im Folgenden wird der Prozess beschrieben, in dem aus einzelnen Stellschrauben Narrative für verschiedene Zukunftsszenarien entwickelt werden.

Stellschrauben: Die verschiedenen Hebel und Hürden lassen sich den Sektoren „Energiewirtschaft/Elektrizität“, „Transport“, „Gebäude“, „Industrie“ und „Landwirtschaft/Landnutzung“ zuordnen. Zentrale noch unsichere Hebel im Bereich der Industrie und der Energiewirtschaft betreffen die Verfügbarkeit von Bioenergie und Technologien zur Kohlenstoffabscheidung und Speicherung (Carbon Capture and Sequestration, CCS), die Zukunft der Kernenergie, die Akzeptanz von Windenergie, und die Förderung von direkter und indirekter Elektrifizierung der Industrie. Im Transportsektor stellen die gezielte Förderung der Elektromobilität, sowie ein Verkaufsverbot von Verbrennern ab 2030 wichtige potentielle Hebel dar. Ein zentraler Hebel im Gebäudesektor ist, ob Kohle-, Öl- und Gasheizungen bis zum Jahr 2050 verboten werden. In der Landwirtschaft kann Präzisionslandwirtschaft und veränderte Fütterung die Emissionen senken. Neben Stellschrauben, die hauptsächlich in die Bereiche Politik und Technologie fallen, wird im zivilgesellschaftlichen Bereich unter anderem untersucht, welche Wirkung eine Änderung des Konsumverhaltens hat. Hier wurde eine Ernährungsumstellung hin zu einer weniger THG-intensiven Kost, weniger Nahrungsmittelabfällen, ein modal shift hin zu mehr Bus, Bahn und Fahrrad, sowie ein bewussterer Lebensstil, der zu einer geringeren Energienachfrage sowohl im Transport als auch im Gebäudesektor führt, untersucht. Die vollständige Liste aller untersuchten Stellschrauben findet sich in Tabelle A1 (Annex).

Dimensionen der Transformation: Um aus der Vielzahl von einzelnen Hebeln und Hürden Narrative für Transformationsszenarien zu entwickeln, werden sie in die drei Dimensionen „**Technologie und Innovation**“, „**Politische Koordination**“ und „**Verhaltensänderung**“ unterteilt. So gehört beispielsweise die Verfügbarkeit von Technologien zur Dimension „Technologie und Innovation“, während die Förderung von Elektromobilität der Dimension „Politische Koordination“ zuzuordnen ist. Die Zuordnung der einzelnen Stellschrauben in die Dimensionen findet sich ebenfalls in Tabelle A1.

Jede Dimension hat dabei je zwei mögliche Realisierungen, die für unterschiedliches Handeln in der Politik, mögliche Technologieentwicklungen oder Entwicklungen in der Gesellschaft stehen. Die unterschiedlichen Maßnahmenpakete und Entwicklungen sind Modellannahmen und somit maßgeblich dafür, auf welchem Weg das Klimaziel erreicht werden soll.

Im Bereich „**Technologie & Innovation**“ steht das Paket „Fokus THG-Minderung“, in dem alle Technologie-Optionen verfügbar sind, dem Paket „Fokus Technologieakzeptanz“ gegenüber, in dem Technologien mit mangelndem (wahrgenommenen) Rückhalt in der Bevölkerung ausgeschlossen bzw. eingeschränkt werden. In der Dimension „**Politische Koordination**“ gibt es den „Marktorientierten“-Ansatz, mit sektorübergreifendem CO₂-eq Preis als zentraler Maßnahme, sowie den „Sektororientierten“-Ansatz, in dem der CO₂-eq Preis durch gezielte Sektorpolitiken flankiert wird. In der Dimension „**Verhaltensänderung**“ wird entweder davon ausgegangen, dass sich das Konsumentenverhalten nur durch Preissignale ändert („Preisorientiert“) oder dass es einen breiten Wandel in der Bevölkerung hin zu einem kohlenstoffarmen und nachhaltigeren Konsum von Gütern und Dienstleistungen gibt („Wertorientiert“).

Narrative: Verschiedene Kombinationen der Maßnahmenpakete der einzelnen Dimensionen lassen 8 verschiedene Szenarien zu. Aus diesen wurden 5 ausgewählt (siehe Tabelle 1), deren Narrative im Folgenden erläutert werden.

1. **Politiksteuernder Ansatz:** Ein breites Spektrum von Klimaschutztechnologien ist technologisch verfügbar. Sozial akzeptiert und politisch zugelassen werden allerdings nur solche Technologien, die für ökologisch und sozial nachhaltig gehalten werden. Die Politik verfolgt das Klimaziel mittels einer Kombination aus THG-Preis und sektorspezifischen Politiken. Die Menschen unterstützen die ambitionierte Klimapolitik der Regierung, berücksichtigen bei ihren individuellen Konsumententscheidungen jedoch nur Preissignale und keine darüber hinausgehenden Nachhaltigkeitsaspekte.
2. **Verhaltensorientierter Ansatz:** Ein breites Spektrum von Klimaschutztechnologien ist technologisch verfügbar. Sozial akzeptiert und politisch zugelassen werden allerdings nur solche Technologien, die für ökologisch und sozial nachhaltig gehalten werden. Die Politik verfolgt das Klimaziel mittels einer Kombination aus THG-Preis, sektorspezifischen Politiken und Appellen zur Verhaltensänderung. Im Gegensatz zu allen anderen Szenarien bemühen sich die Menschen in diesem Szenario, ihren individuellen Beitrag zu leisten, indem sie auf einen kohlenstoffarmen und nachhaltigen Konsum von Gütern und Dienstleistungen achten.
3. **Technologieorientierter Ansatz:** Ein breites Spektrum von Klimaschutztechnologien ist technologisch verfügbar und sozial akzeptiert. Die Politik verfolgt das Klimaziel mittels einer Kombination aus THG-Preis und sektorspezifischen Politiken.
4. **Akzeptanzorientierter Ansatz:** Ein breites Spektrum von Klimaschutztechnologien ist technologisch verfügbar. Sozial akzeptiert und politisch zugelassen werden allerdings nur solche Technologien, die für ökologisch und sozial nachhaltig gehalten werden. Die Politik strebt das Klimaziel mittels eines sektorübergreifenden einheitlichen hohen THG-Preises an.
5. **Marktwirtschaftlich orientierter Ansatz:** Ein breites Spektrum von Klimaschutztechnologien ist technologisch verfügbar und sozial akzeptiert. Die Politik strebt das Klimaziel mittels eines sektorübergreifenden einheitlichen hohen THG-Preises an.

		Technologie & Innovation	Politische Koordination	Verhaltensänderung
S1	Politiksteuernder Ansatz	Fokus Technologieakzeptanz	Sektororientiert	Preisorientiert
S2	Verhaltensorientierter Ansatz	Fokus Technologieakzeptanz	Sektororientiert	Wertorientiert
S3	Technologieorientierter Ansatz	Fokus THG-Minderung	Sektororientiert	Preisorientiert
S4	Akzeptanzorientierter Ansatz	Fokus Technologieakzeptanz	Marktorientiert	Preisorientiert
S5	Marktwirtschaftlich orientierter Ansatz	Fokus THG-Minderung	Marktorientiert	Preisorientiert

Tabelle 2.1: Szenario-Matrix. Die einzelnen Szenarien sind in den Zeilen der Matrix aufgelistet, während die Spalten die Dimensionen verschiedener Aspekte der Emissionsreduzierung darstellen.

Klimaziel und Rahmenbedingungen: Zur besseren Vergleichbarkeit der Maßnahmenpakete wurde das Klimaziel so gewählt, dass die EU¹ im Jahr 2050 Restemissionen von 200 Mt CO₂-eq/a nicht überschreitet. Das ist notwendig, da insbesondere Szenarien mit eingeschränkter Verfügbarkeit von CO₂-Entnahme Technologien THG-Neutralität in 2050 nicht erreichen können, da sie inklusive der Landsenken maximal nur ca. 450 Mt CO₂/a CO₂-Entnahme zur Verfügung haben, während die nicht-CO₂ Emissionen in 2050 alleine ohne eine Änderung des Lebensstils aber schon 490 Mt CO₂eq betragen. Das bedeutet, dass zusätzliche CO₂-Entnahmen in Höhe von 200 Mt CO₂/a durch in den Szenarien nicht abgebildete Optionen wie z.B. Kohlenstoffbindung im Boden erbracht werden müssen. Zudem gibt es im Annex eine vergleichende Analyse zu Szenarien in denen THG-Neutralität erreicht wird.

Integrierte Bewertungsmodelle (Integrated Assessment Model, IAM)

IAMs sollen politikrelevante Erkenntnisse über globale Umwelt- und insbesondere Klimaveränderungen liefern, sowie Fragen der nachhaltigen Entwicklung beantworten, indem sie eine quantitative Beschreibung der wichtigsten Prozesse in den Systemen Mensch und Erde und ihrer Wechselwirkungen liefern. Das für die vorliegende Analyse verwendete REMIND-MAGPIE Modell beschreibt das globale Energie-, Ökonomie- und Landnutzungssystem und ist in der Lage, Transformationspfade hin zu einem vorgegebenen Klimaziel zu berechnen, die die volkswirtschaftlichen Gesamtkosten minimieren. Dabei führen unterschiedliche Modellannahmen bzgl. Demographie und Entwicklungsstatus einzelner Länder, Wirtschaft, Lebensweise, politischem und institutionellem Rahmen, Technologie, sowie bzgl. Umwelt und natürlichen Ressourcen zu einer Vielzahl von möglichen Transformationspfaden. Diese unterschiedlichen Pfade werden Szenarien genannt und sind nicht als Vorhersagen über die Zukunft zu verstehen. Vielmehr erlauben sie es uns, mögliche Zukunftsoptionen und die Annahmen, von denen diese abhängen sowie die Handlungsoptionen, durch die diese Zukunftsoptionen entstehen könnten, zu erforschen.

Für den internationalen Rahmen wird angenommen, dass alle anderen Länder gemeinsam eine Klimapolitik verfolgen, die mit dem 1,5° Ziel kompatibel ist. Diese Annahme stellt sicher, dass die Rohstoffverfügbarkeit in der EU auch mit einem globalen 1,5° Pfad kompatibel ist². Des Weiteren wirken die einzelnen Stellschrauben (wie z.B. die Förderung der Elektromobilität) der Szenarien nur auf Länder der EU. Der Rest der Welt verfolgt in allen Szenarien die gleiche Klimapolitik und wird von den verschiedenen Szenarien nur indirekt beeinflusst, sodass die Maßnahmenpakete im europäischen Rahmen bewertet werden können.³

Methodik: Zur Berechnung der Transformationspfade wird das Integrierte Bewertungsmodell REMIND-MAGPIE verwendet (siehe Textbox Integrierte Bewertungsmodelle). Es beschreibt das globale Energie-, Ökonomie- und Landnutzungssystem mit der Europäischen Union einschließlich des Vereinigten Königreichs als eigenständiger Region. Eine detaillierte Beschreibung des Modells befindet sich im Annex.

¹ In den Szenarien ist EU28 modelliert, d.h. inklusive UK

² Würde der Rest der Welt eine weniger ambitionierte Klimapolitik verfolgen, würde beispielsweise der Weltmarktpreis für Bioenergie sinken und die EU könnte Biomasse günstiger importieren als es unter einem (gewünschten) globalen 1,5° Pfad der Fall wäre.

³ Indirekt können die unterschiedlichen Szenarien in der EU die Klimapolitik im Rest der Welt beeinflussen, da die Nachfrage von Rohstoffen und Primärenergieträgern in der EU – wenn auch nur in geringem Maße – die Preise auf dem Weltmarkt beeinflusst.

3. Einfluss der Technologieverfügbarkeit auf die Transformation

In den vorliegenden Szenarien untersuchen wir den Einfluss der Technologieverfügbarkeit auf die Transformation. In Szenarien mit Fokus THG-Minderung (S3, S5) stehen alle Technologien zur Verfügung, in Szenarien mit Fokus Akzeptanz (S1, S2, S4) werden umstrittene Technologien wie CCS, Bioenergie, Kernenergie und Windenergie eingeschränkt. Die Einschränkung von CCS impliziert eine Einschränkung der CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre, die zu einem Großteil über Bioenergie mit CCS (BECCS) erfolgt. Direct Air Capture mit CCS (DACCS) steht als Technologie zur Verfügung, wird aber aufgrund der höheren Kosten in der EU nicht genutzt.

Eine geringere Verfügbarkeit von CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre lässt weniger Spielraum für nachfrageseitige Emissionen zu (Abbildung 3.1) und erhöht damit den CO₂-Preis in 2030 in sektororientierten Szenarien um 36 % von 125 €/t CO₂ (S3) auf 170 €/t CO₂ (S1) und in marktorientierten Szenarien sogar um über 135 % von 194 €/t CO₂ (S5) auf 456 €/t CO₂ (S4). In den sektororientierten Szenarien werden die Restemissionen schon durch die Sektorpolitiken stark reduziert, was den Bedarf an CO₂-Entnahme und damit auch den Einfluss der Technologieverfügbarkeit verringert. Mehr CO₂-Entnahme durch BECCS erfordert mehr Bioenergie, was zu einem starken Anstieg der dafür genutzten Ackerfläche führt (Abbildung 3.2).

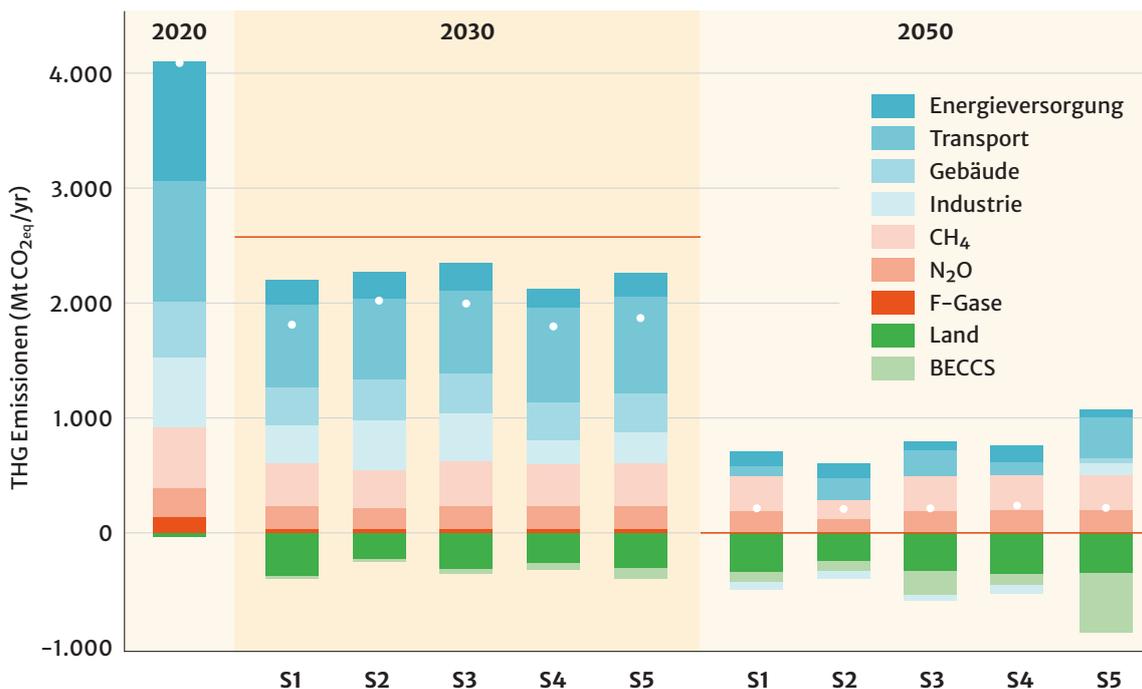


Abbildung 3.1: THG-Emissionen in Europa in 2030 und 2050 für alle fünf Szenarien. Weiße Punkte markieren die netto Gesamtemissionen, rote Linien zeigen die EU-Ziele. Szenarien mit Fokus THG-Minderung (S3, S5) erlauben in 2050 noch mehr Spielraum für Restemissionen, da diese durch mehr BECCS ausgeglichen werden können.

Der grundlegende Zielkonflikt besteht hier zwischen der Akzeptanz von Technologien wie CCS und größeren Ackerflächen für Bioenergie auf der einen (S5) und deutlich höheren CO₂-Preisen auf der anderen Seite (S4). Dieser Zielkonflikt kann entweder durch gezielte Sektorpolitiken abgemildert werden, die den Bedarf an CO₂-Entnahme reduzieren, oder durch den Einsatz von anderen CO₂-Entnahmoptionen wie z.B. der Erhöhung des Bodenkohlenstoffs oder Pflanzenkohle. Hier ist allerdings unsicher ob und in welchem Umfang diese zur Verfügung stehen werden, und wie lange der Kohlenstoff gespeichert werden kann, da Landsenken durch Wald oder die Erhöhung des Bodenkohlenstoffs potenziell reversibel sind.

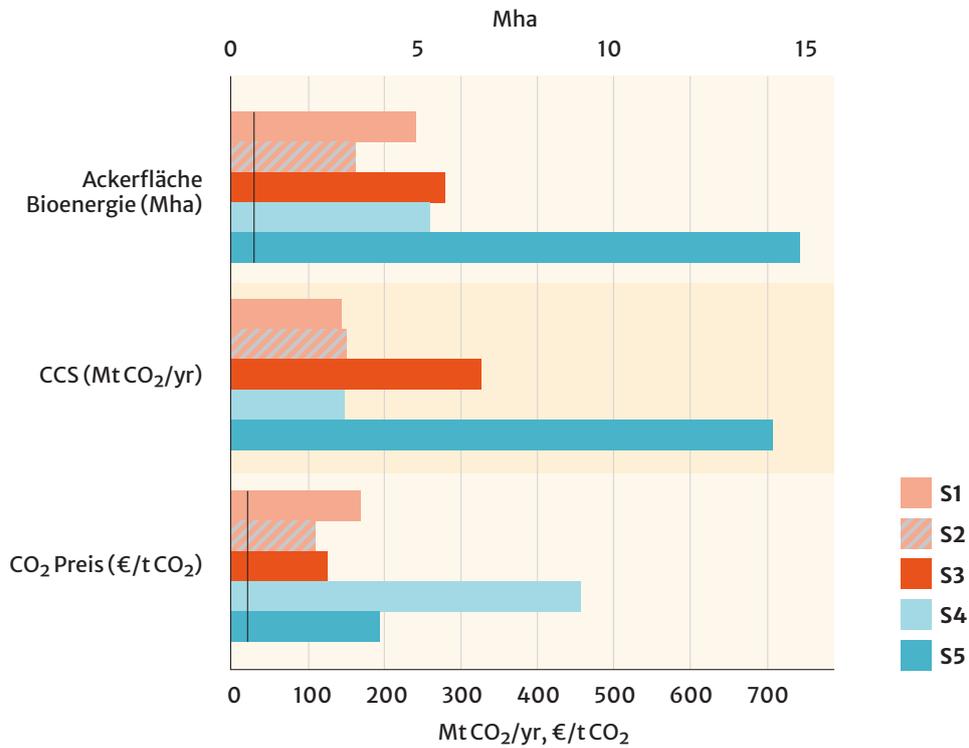


Abbildung 3.2: Zielkonflikte zwischen Ackerfläche für Bioenergie und CCS in 2050 in Europa einerseits und CO₂-Preisen in 2030 andererseits für alle fünf Szenarien. Die schwarzen Linien zeigen die jeweiligen Werte in 2020. Mehr CO₂-Entnahme in S5 (dunkelblau) durch BECCS erfordert mehr Ackerfläche für den Anbau von Energiepflanzen und mehr CCS, führt aber zu nur weniger als halb so hohen CO₂-Preisen wie S4 (hellblau) in dem CCS und Bioenergie eingeschränkt sind. Sektorpolitiken reduzieren die verbleibenden Restemissionen und damit den Bedarf an CO₂-Entnahme und entschärfen so diesen Zielkonflikt (S3, dunkelrot vs. S1, hellrot).

4. Einfluss der politischen Koordination auf die Transformation

Klimapolitische Maßnahmen in Deutschland und der EU umfassen derzeit sowohl verschiedene CO₂-Preise als auch gezielte Sektorpolitiken wie Subventionen für Elektroautos oder Flottengrenzwerte. Um zukünftige Klimaziele zu erreichen müssen die Maßnahmen verschärft werden. Diese Verschärfung kann entweder alleine über den CO₂-Preis erreicht werden, oder es kann eine Kombination von gezielten Sektorpolitiken und einem CO₂-Preis implementiert werden. Diese beiden Optionen werden in den Szenarien untersucht. Marktorientierte Szenarien setzen auf den CO₂-Preis als Hauptinstrument, während in sektororientierten Szenarien gezielte Politiken in allen Sektoren zusätzlich zum CO₂-Preis eine starke Lenkungswirkung entfalten, etwa über ein Verbot von Öl- und Gasheizungen oder ein Verbot der Neuzulassung von PKW mit Verbrennungsmotor ab 2030. Ein hoher CO₂-Preis als zentrales Instrument ist dennoch nötig, da die Sektorpolitiken nicht alle Bereiche erfassen.

Über alle Sektoren hinweg zeigt sich in den sektororientierten Szenarien eine stärkere Reduktion von kohlenstoffbasierten **Energieträgern** wie Öl und Gas und damit einhergehend eine höhere direkte Elektrifizierung. Insbesondere im Transportsektor dürften ab 2030 keine PKW-Verbrenner mehr zugelassen werden, um bis 2050 die Emissionen auf nahezu null zu senken, da alternative Kraftstoffe wie Wasserstoff und synthetische Kraftstoffe vollständig in der Industrie und im Schwerlastverkehr gebraucht werden (Abbildung 4.1). Um rein preisbasiert so schnell einen Großteil der Verbrenner im Personenverkehr aus dem Markt zu drängen wäre ein sehr hoher CO₂-Preis nötig (Szenario 4), der entsprechend große Verteilungswirkungen zur Folge hätte (s. Kapitel 6). Allerdings folgen auch aus Sektorpolitiken indirekte Verteilungswirkungen, es werden aber keine Einnahmen generiert, die zur Kostenentlastung der Haushalte genutzt werden können. Dennoch legen die Ergebnisse nahe, dass ein CO₂-Preis als alleiniges Instrument für eine Verkehrswende nicht ausreicht.

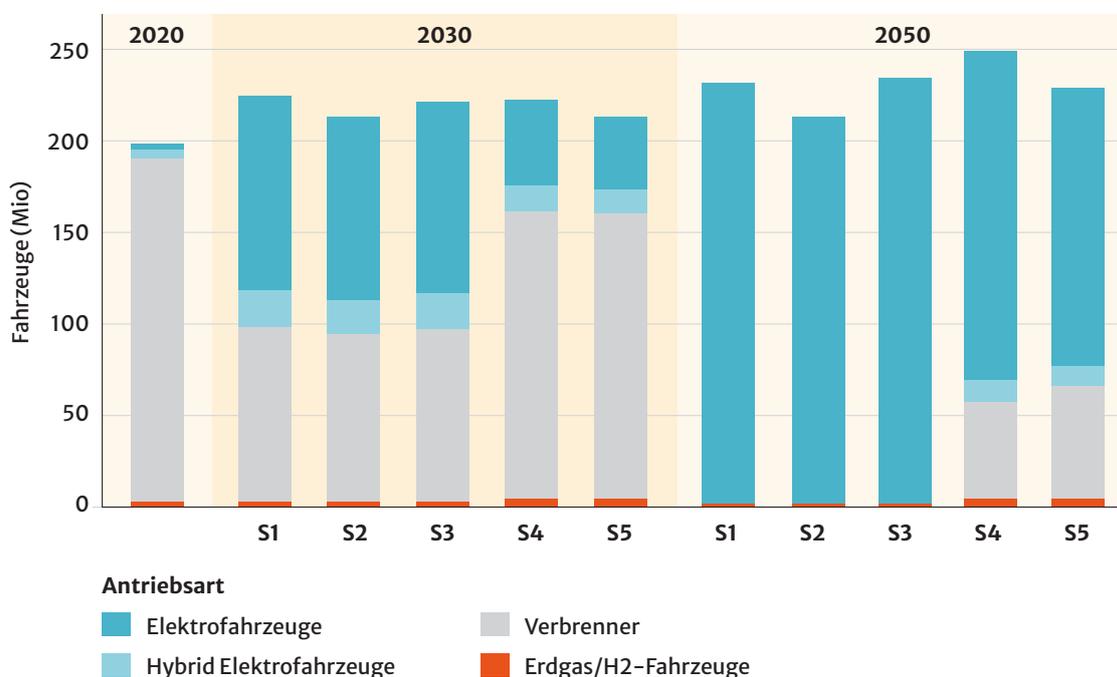


Abbildung 4.1: Zugelassene Pkw in Europa nach Antriebsart in allen fünf Szenarien. In den sektororientierten Szenarien S1, S2, S3 werden ab 2030 deutlich mehr Elektroautos zugelassen, so dass in 2050 nahezu keine Verbrenner mehr vorhanden sind.

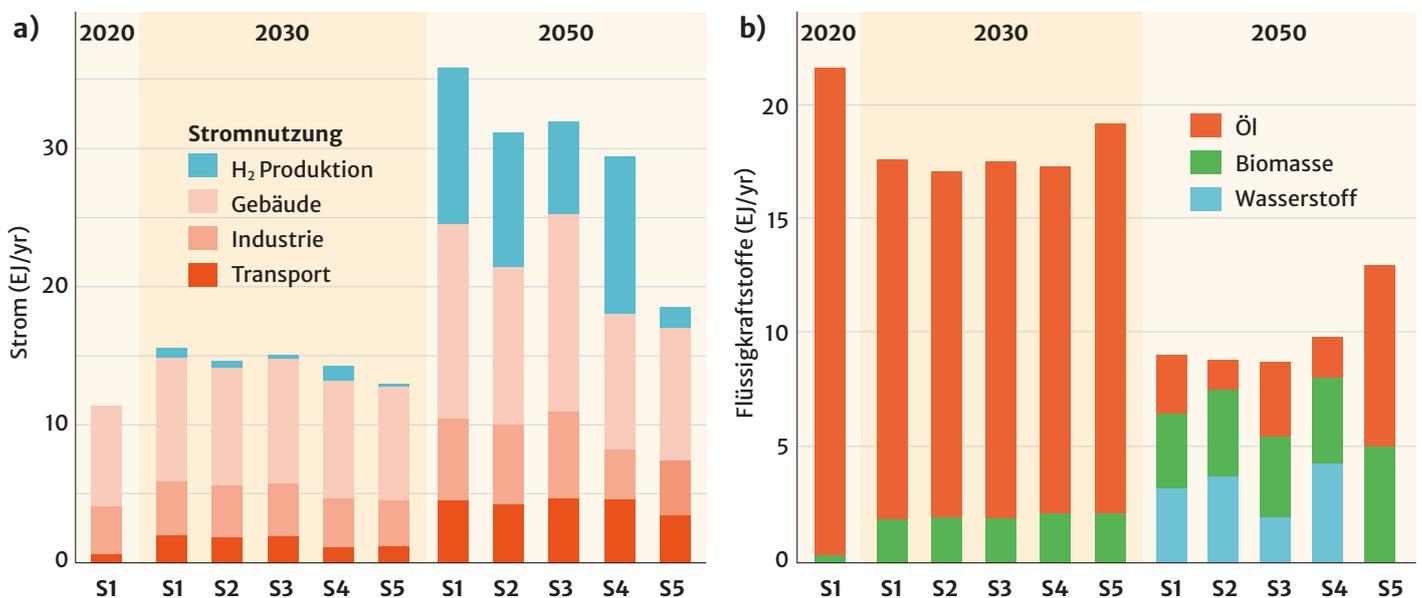


Abbildung 4.2: a) Stromnutzung und b) Flüssigkraftstoffe in Europa aufgeschlüsselt nach Energieträgern für alle fünf Szenarien. In den sektororientierten Szenarien (S1, S2, S3) steigt der Bedarf an Strom deutlich, dafür sinkt der Bedarf an Flüssigkraftstoffen. Eine ähnliche Entwicklung zeigt das marktorientierte Szenario S4, in dem aufgrund eingeschränkter Technologieverfügbarkeit die CO₂-Preise sehr hoch sind.

Der Umstieg von kohlenstoffbasierten Energieträgern auf Strom führt einerseits zu einem niedrigeren Bedarf an Gas und Öl und damit zu einer geringeren Abhängigkeit von Importen, und andererseits zu einem höheren Bedarf an Strom und Wasserstoff und damit zu einem stärkeren Ausbau von erneuerbaren Energien (Abbildung 4.2). So steigt der Strombedarf in den sektororientierten Szenarien (S1 – 3) bis 2050 um einen Faktor 3 gegenüber 2020, während der Zuwachs in einem marktorientierten Szenario mit voller Technologieverfügbarkeit (S5) nur bei ca. 60 % liegt. Da gleichzeitig noch die fossile Stromerzeugung ersetzt werden muss, liegt der jährliche Zubau von Wind- und Solarenergie in 2030 schon in S5 um den Faktor 3 bzw. 6,6 höher als in 2020, und muss in den sektororientierten Szenarien nochmals nahezu verdoppelt werden auf den Faktor 5 – 6 bzw. 10 – 12. Dadurch werden auch die in 2050 verbleibenden Restemissionen erheblich gesenkt. Das reduziert sowohl den Bedarf an CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre als auch den dann noch nötigen CO₂-Preis. Allerdings bedeutet ein geringerer CO₂-Preis nicht, dass auch die gesamtwirtschaftlichen Kosten sinken, denn auch die Sektorpolitiken führen zu Kosten. Diese dürften zunächst höher liegen als in einem markt-basierten System. Unterm Strich lassen sich die gesamtwirtschaftlichen Vermeidungskosten nur dann verringern, wenn zusätzliche Politikmaßnahmen wie die Förderung neuer Technologien oder Technologiestandards bestehendes Marktversagen verringern statt neue Ineffizienzen zu schaffen. Welches System letztlich gesamtwirtschaftlich ökonomisch günstiger ist, ist noch unsicher und erfordert weitergehende Forschung.

Der grundlegende Zielkonflikt zwischen den beiden Ansätzen liegt bei der gesellschaftlichen Akzeptanz und der politischen Umsetzbarkeit. Ein marktbasierendes System benötigt im Wesentlichen ein einziges Instrument, den CO₂-Preis. Ein sehr hoher CO₂-Preis geht jedoch mit Verteilungswirkungen einher, die gesellschaftliche Konflikte auslösen können und damit Akzeptanz und Umsetzbarkeit gefährden. Gezielte Sektorpolitiken können in den vorliegenden Szenarien den für die Erreichung der Klimaziele nötigen CO₂-Preis deutlich senken, können aber möglicherweise die gesamtwirtschaftlichen Vermeidungskosten erhöhen und verlangen stringente ordnungsrechtliche Maßnahmen wie Verbote, die gesellschaftlich akzeptiert und politisch umgesetzt werden müssen.

5. Einfluss von Verhaltensänderung auf die Transformation

Ein wichtiger Faktor für die Erreichung der THG-Neutralität in Deutschland und der EU kann die Veränderung der Lebensgewohnheiten der Bürger:innen sein, die zu einer erheblichen Verschiebung der Konsumpräferenzen führen kann. Im Folgenden stellen wir zwei Szenarien gegenüber, um die Auswirkungen einer solchen freiwilligen Veränderung des Lebensstils zu analysieren. Während in Szenario S1 Konsumententscheidungen lediglich aufgrund von Preissignalen erfolgen, wird in S2 angenommen, dass es darüber hinaus zu freiwilligen Verhaltensänderungen der Bürger:innen entsprechend der Bewertung von Nachhaltigkeitszielen und weg von Produkten mit hohen THG-Emissionen kommt. Insbesondere wird angenommen, dass sich die Bürger:innen freiwillig an die EAT-Lancet-Ernährungsempfehlungen halten, wobei sie in erheblichem Maße tierische Produkte durch andere nahrhafte Alternativen ersetzen, im Verkehrsbereich die Nutzung von Bahnen, Bussen und Fahrrädern dem privaten Pkw vorziehen, und im Gebäudesektor den Endenergiebedarf der Haushalte bewusst reduzieren.

Es zeigt sich, dass durch eine solche umfassende Änderung des Lebensstils der erforderliche CO₂-Preis 35 % niedriger ist als im Szenario mit preisorientiertem Ansatz (Abbildung 3.2., S2 vs. S1). Die größte Emissionsreduktion durch Verhaltensänderungen wird durch die Verringerung der Nicht-CO₂-Emissionen aus der landwirtschaftlichen Produktion erzielt (Abbildung 3.1). Nicht-CO₂-Emissionen lassen sich bei gleichbleibender Produktion nur wenig reduzieren. Die zusätzliche Reduktion ist hauptsächlich auf die Änderung der Ernährungsgewohnheiten und die Substitution der Nahrungsmittelnachfrage im Agrarsektor zurückzuführen. Durch die Verringerung der landwirtschaftlichen Emissionen wird auch der Druck auf Emissionsminderungen in anderen Sektoren reduziert, einschließlich der Nachfrage nach CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre (Abbildung 3.1).

Die veränderten Ernährungsgewohnheiten führen zu rückläufiger statt stetig steigender Nachfrage nach tierischen Produkten. Dadurch werden weniger Weideflächen gebraucht, die dann zu Ackerflächen umgewidmet werden können. Aus diesem Grund nimmt die gesamte Ackerfläche im Szenario mit Verhaltensänderung von 2020 bis 2050 um ~13 % zu, im Vergleich zu einem Rückgang um ~6 % bis 2050 im Szenario mit preisorientiertem Ansatz im gleichen Zeitraum (Abbildung 5.1b). Trotz der sinkenden Inlandsnachfrage nach tierischen Produkten steigen die Exporte dieser Produkte eher nicht, sondern bleiben auf dem gleichen Niveau wie in den alternativen Szenarien, so dass keine Möglichkeiten bestehen, den komparativen Vorteil Europas für tierische Produkte auf den internationalen Märkten weiter auszubauen. Da die heimischen Nahrungsmittelsysteme auf eine niedrige Nachfrage ausgerichtet sind, sind auch die Preise für landwirtschaftliche Erzeugnisse im Endeffekt rückläufig, im Gegensatz zu dem ~30 %igen Anstieg des Agrarpreisindex im Jahr 2050 in alternativen Szenarien mit stetig steigender Nachfrage nach tierischen Erzeugnissen (Abbildung 5.1c; S2 vs. S1, S3, S4, S5). Darüber hinaus ergeben sich im Szenario zur Änderung des Lebensstils weitere positive Auswirkungen auf die Umwelt (weniger Umweltverschmutzung) und die öffentliche Gesundheit (Prävalenz von Übergewicht) (s.u. Kap. 7.a).

Der grundlegende Zielkonflikt besteht hier zwischen einer tiefgreifenden Änderung des Verhaltens, die nicht leicht zu erzielen ist, und höheren CO₂-, Verbraucher- und Nahrungsmittelpreisen. Der geringe Druck auf die Nahrungsmittelsysteme ergibt sich allerdings nur in Kombination mit der Annahme, dass die aus Biomasse erzeugte Energie aufgrund mangelnder gesellschaftlicher Akzeptanz erheblich eingeschränkt wird. Wenn Technologien zur Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre voll unterstützt würden und eine hohe Nachfrage nach Bioenergiepflanzen aus dem landwirtschaftlichen Anbau bestünde, wäre eine solche Landwirtschaft mit geringer Intensität nicht möglich, und es könnten sich neue Zielkonflikte ergeben.

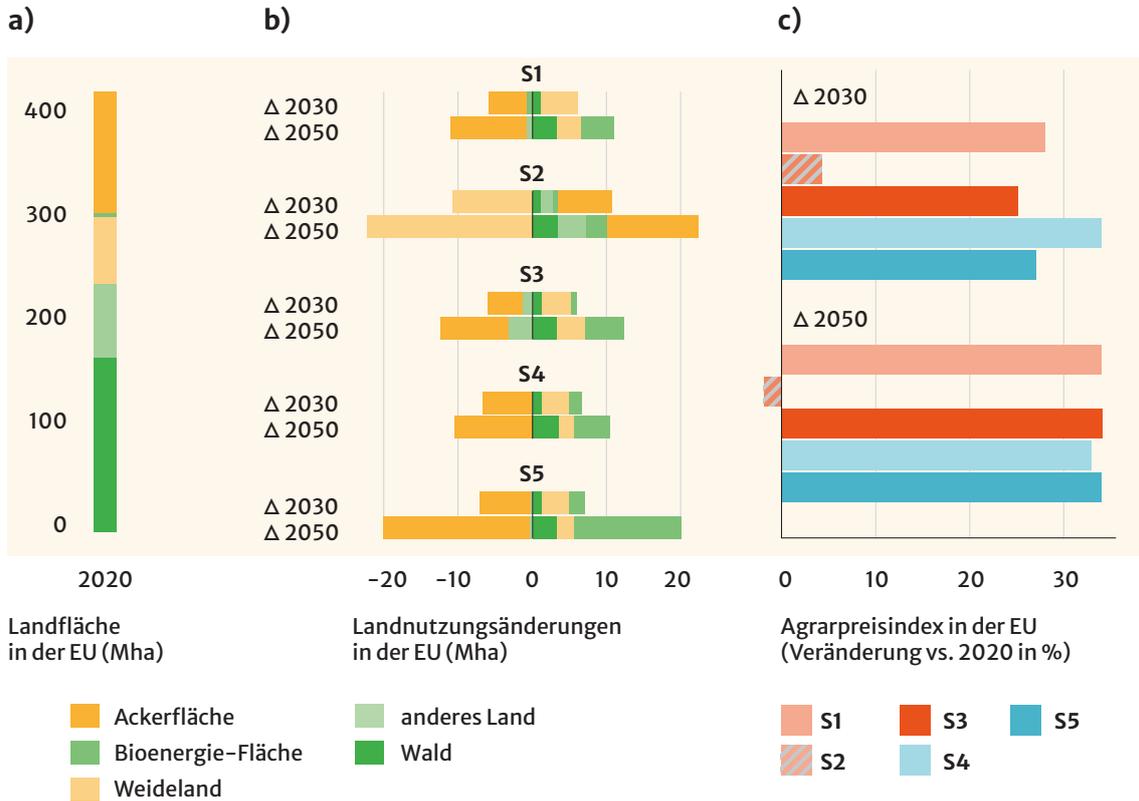


Abbildung 5.1 a) Landfläche in der EU in verschiedenen Landnutzungspools im Jahr 2020 (Ackerfläche 114,5 Mha, Bioenergie-Fläche 0,7 Mha, Weideland 65 Mha, anderes Land 69,4 Mha, Wald 163 Mha). b) Veränderung der Flächennutzung und c) Agrarpreisindex in der EU in den Jahren 2030 und 2050 im Vergleich zu 2020.

6. Verteilungswirkungen

Die öffentliche Akzeptanz und damit einhergehende Gerechtigkeitsaspekte von Klimaschutzmaßnahmen spielen eine bedeutende Rolle für eine erfolgreiche Umsetzung der Transformationspfade. Aus diesem Grund ist die Berücksichtigung der sozio-ökonomischen Auswirkungen der in den Szenarien genutzten Politikinstrumente ein wichtiger Bestandteil zur Beurteilung der Transformationspfade.

6.1 Verteilungseffekte eines CO₂-Preises

In allen Szenarien spielt der CO₂-Preis eine wichtige Rolle. In diesem Kapitel werden daher die Verteilungswirkungen einer umfassenden CO₂-Bepreisung für verschiedene sozio-ökonomische Gruppen in Deutschland empirisch untersucht. Dabei wird die Kostenbelastung verschiedener Haushaltsgruppen vor Rückverteilung der Einnahmen aus dem CO₂-Preis und nach Einführung einer Rückverteilung in Form einer Pro-Kopf-Pauschale betrachtet. Die untersuchten Preishöhen orientieren sich dabei an den CO₂-Preisen, welche durch die fünf Szenarien für das Jahr 2025 festgelegt werden.

Die Berechnung der durch einen CO₂-Preis entstehenden jährlichen Mehrkosten basiert auf der Bestimmung der direkten und indirekten CO₂-Emissionen des Konsums privater Haushalte in Deutschland mithilfe der umweltökonomischen Gesamtrechnung (UGR) (Destatis, 2019), der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung (VGR) (Destatis, 2020b) sowie der aktuellen Welle der Einkommens- und Verbrauchsstichprobe (EVS) für das Jahr 2018 (Destatis, 2020a). Somit können die kurzfristigen Verteilungswirkungen anhand der aus ca. 40.000 Haushalten bestehenden, für Deutschland repräsentativen EVS-Daten untersucht werden.

a. Kostenbelastung ohne Rückverteilung nach sozioökonomischen Gruppen

Die Analyse zeigt, dass die durchschnittliche jährliche Kostenbelastung für Haushalte mit steigenden CO₂-Preisen zunimmt. Während bei einem CO₂-Preis von 57 €/t CO₂ (Verhaltensorientierter Ansatz, Szenario 2) die durchschnittlichen Kosten pro Jahr bei ca. 700 € liegen, erreichen die Kosten bei einem CO₂-Preis von 87 €/t CO₂ (Politiksteuernder Ansatz, Szenario 1) bereits einen Wert von ca. 1.030 € und liegen beim höchsten betrachteten Preis von 230 €/t CO₂ (Akzeptanzorientierter Ansatz, Szenario 4) bei 2.180 € pro Jahr. Insbesondere bei hohen Preisen stellt die CO₂-Bepreisung eine substantielle Kostenbelastung für Haushalte dar, allerdings unterscheidet sich die Belastung je nach Haushaltsgruppe teilweise stark.

Misst man die Kostenbelastung relativ am Haushaltseinkommen⁴, zeigt sich, dass eine CO₂-Bepreisung ohne Rückverteilung der Einnahmen unabhängig von der Preishöhe regressiv wirkt (Abbildung 6.1). Dies bedeutet, dass einkommensschwache Haushalte, wenn auch absolut am geringsten, relativ am stärksten belastet werden und wohlhabende Haushalte relativ am schwächsten (Tabelle 7.1). Betrachtet man die Belastung entlang der Haushaltsgröße, nimmt die absolute sowie relative Kostenbelastung mit der Haushaltsgröße zu (Abbildung 6.3). Da bestimmte Grundbedürfnisse, wie Wärme und Strom, zu einem gewissen Grad unabhängig von der Anzahl der Haushaltsmitglieder sind, steigen der absolute Verbrauch und somit die absoluten Kosten unterproportional mit der Haushaltsgröße an. Da aber auch das Haushaltseinkommen unterproportional mit der Haushaltsgröße steigt, nimmt die relative Kostenbelastung trotzdem zu.

⁴ Nettoäquivalenzeinkommen: Das Nettoäquivalenzeinkommen bezeichnet das Gesamteinkommen eines Haushalts nach Steuern und anderen Abzügen, geteilt durch die Anzahl der Haushaltsmitglieder, die in gleichgestellte Erwachsene umgerechnet werden; die Haushaltsmitglieder werden dabei nach ihrem Alter basierend auf der sogenannten modifizierten OECD-Äquivalenzskala gewichtet (OECD, 2009) gewichtet. Durch diese Gewichtung werden Lebensstandards unabhängig von der Haushaltsgröße und Zusammensetzung vergleichbar.

Einkommensquartil ⁵	1	2	3	4
Haushaltsnettoäquivalenzeinkommen in €	15.448	25.161	34.766	53.460
Kosten pro Haushalt (€/a)	687	960	1.159	1.322
Anteil am Einkommen	4,5 %	3,8 %	3,4 %	2,6 %

Tabelle 7.1: Kostenverteilung bei einem CO₂-Preis von 87 €/t CO₂ (Szenario 1)

Kaum merkbare Unterschiede ergeben sich wiederum in der absoluten und relativen Kostenbelastung zwischen Haushalten in der Stadt und auf dem Land. Hier liegt in allen drei untersuchten Regionstypen (Agglomerationsräume, Verstädterte Räume und Ländliche Räume⁶) die relative Kostenbelastung um die 3 %, wenn auch Haushalte auf dem Land mit geringem Abstand die höchste relative Belastung erfahren (Abbildung 6.2). Haushalte auf dem Land verzeichnen zwar durchschnittlich höhere CO₂-Verbräuche im Verkehrsbereich als Haushalte in verstädterten Räumen, emittieren dafür aber weniger CO₂ durch andere Konsumkategorien, wie Freizeitgüter, Waren und Dienstleistungen, als Haushalte in städtischen Räumen, sodass die jährlichen Emissionen jeweils für Haushalte auf dem Land sowie in der Stadt bei ca. 13,6 Tonnen CO₂ liegen. Die leicht höhere relative Belastung der Haushalte auf dem Land kommt durch ein niedriges Durchschnittseinkommen dieser Haushalte im Vergleich zu Haushalten in städtischen Räumen zustande. Haushalte in Agglomerationsräumen verzeichnen die niedrigsten Emissionen mit ca. 12,9 Tonnen CO₂ pro Jahr und werden dadurch am geringsten durch einen CO₂-Preis belastet.

Auch zwischen Mieter*innen und Eigentümer*innen sind die Unterschiede gering; die höhere absolute Kostenbelastung von Eigentümer*innen zeigt allerdings, dass Eigentümer*innen u.a. durch eine durchschnittlich größere Haushaltsgröße sowie eine größere Wohnfläche einen höheren CO₂-Verbrauch für Gebäudeenergie als zur Miete wohnende Personen verzeichnen. Relativ gesehen ist die Belastung wiederum für Mieter*innen höher (Abbildung 6.4), was durch durchschnittlich geringere Einkommen im Vergleich zu Eigentümer*innen zu erklären ist. Unterscheidet man nach beruflicher Tätigkeit des Haushaltsvorstands, liegt die relative Kostenbelastung für Arbeitslose etwas mehr als einen Prozentpunkt über der sehr ähnlichen relativen Kostenbelastung von Erwerbstätigen und Rentner*innen. Auch wenn Arbeitslose tendenziell einen niedrigeren CO₂-Verbrauch haben, gehören diese Haushalte meist zu den einkommensschwachen Haushalten. Für diese Haushalte machen die Ausgaben für Energie einen größeren Anteil am Einkommen aus als für einkommensstarke Haushalte, womit auch die relativ höhere Kostenbelastung durch einen CO₂-Preis zu erklären ist.

b. Kostenbelastung mit Rückverteilung nach sozioökonomischen Gruppen

Aus dieser Haushaltsanalyse ergeben sich folglich zwei Gruppen, die anteilig am Einkommen stark durch einen CO₂-Preis belastet werden: Einkommensschwache Haushalte sowie große Haushalte. Im Zuge einer CO₂-Bepreisung entstehen aber immer auch Einnahmen, die an die Bevölkerung zurück verteilt werden können. Somit ist für die Betrachtung der Verteilungswirkungen nicht nur der Preis, sondern auch die Rückverteilung an die Haushalte entscheidend. In dieser Analyse wird dazu die viel diskutierte Pro-Kopf-Pauschale als direkte und altersunabhängige Rückverteilung betrachtet.

⁵ Einkommensquartile teilen Haushalte in vier gleich große Gruppen ein, wobei das 1. Quartil den 25 % der Haushalte mit dem niedrigsten Einkommen entspricht und das 4. Quartil die 25 % der einkommensstärksten Haushalte umfasst.

⁶ Die drei betrachteten Regionstypen orientieren sich an der EVS und teilen sich in Agglomerationsräume (über 300.000 Einwohner oder Dichte um 300 Einwohner / km²), Verstädterte Räume (Dichte größer als 150 Einwohner / km² oder Oberzentrum über 100.000 Einwohner bei einer Mindestdichte von 100 Einwohner / km²) und Ländliche Räume (Dichte über 150 Einwohner / km² und ohne Oberzentrum über 100.000 Einwohner; mit Oberzentrum über 100.000 Einwohner und Dichte unter 100 Einwohner / km²) auf.

Die empirische Analyse für deutsche Haushalte zeigt, dass eine Pro-Kopf-Pauschale zu einer vollständigen Umkehrung der regressiven Verteilungswirkungen führt, sodass nach Rückverteilung Haushalte in den unteren Einkommensquartilen netto entlastet werden, während wohlhabende Haushalte weiterhin netto belastet werden (Abbildung 6.1). Insgesamt werden alle Haushalte schwächer belastet als zuvor. Bei einem CO₂-Preis von 87 €/t CO₂ würde die Pauschale 496 Euro pro Kopf und Jahr entsprechen, wodurch die Mehrkosten für Haushalte im Durchschnitt bei nahezu null Euro lägen, im Vergleich zu 1.030 Euro vor Rückverteilung eines CO₂-Preises. Diese Art der Rückverteilung kommt neben einkommensschwachen Haushalten auch Haushalten mit vielen Haushaltsmitgliedern zugute, die netto ebenfalls stark entlastet werden, während Single-Haushalte weiterhin belastet werden, nun sogar absolut und relativ pro Kopf am stärksten (Abbildung 6.3). Dies liegt an der Natur einer altersunabhängigen Pro-Kopf-Pauschale und der Tatsache, dass der CO₂-Verbrauch und somit die CO₂-Kosten unterproportional mit der Haushaltsgröße ansteigen.

Eine Pro-Kopf-Pauschale führt auch für andere Haushaltsgruppen zu einer Entlastung. Wie bereits vor Rückverteilung der Einnahmen sind die absoluten und relativen Kostenbelastungen für Haushalte im städtischen und ländlichen Raum ähnlich und liegen nun im Mittel bei nahezu null. Ein leichter Unterschied lässt sich in der relativen Belastung erkennen: Während vor Rückverteilung Haushalte in Agglomerationsgebieten relativ am schwächsten (3,1 %) belastet werden und Haushalte auf dem Land relativ am stärksten (3,4 %) werden, werden Letztere nach Rückverteilung im Mittel am schwächsten belastet (Abbildung 6.2). Da die CO₂-Emissionen und somit die absolute Belastung insgesamt sehr ähnlich sind, lassen sich die leichten Unterschiede in der relativen Belastung durch durchschnittlich niedrigere Einkommen auf dem Land erklären. Mieter*innen profitieren tendenziell etwas stärker von einer Pro-Kopf-Pauschale und werden netto im Durchschnitt sogar entlastet, während Eigentümer*innen weiterhin für ihren vergleichsweise höheren CO₂-Verbrauch zahlen (Abbildung 6.4). Ähnlich verhält es sich für verschiedene Berufsgruppen: Während Erwerbstätige und Rentner*innen zwar schwächer als ohne Rückverteilung, aber im Mittel weiterhin belastet werden, werden Arbeitslose durch eine Pro-Kopf-Pauschale stark entlastet, so dass sie netto Geld erhalten.

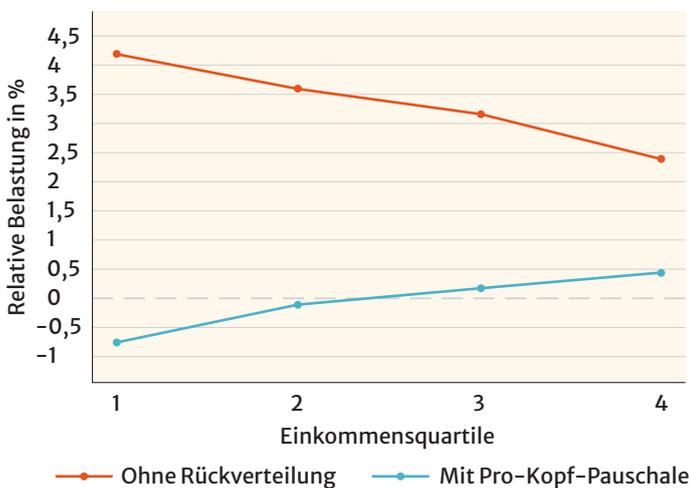


Abbildung 6.1: Jährliche relative Belastung vor und nach einer Pro-Kopf-Rückverteilung nach Einkommensquartilen für einen CO₂-Preis von 87 €/t CO₂

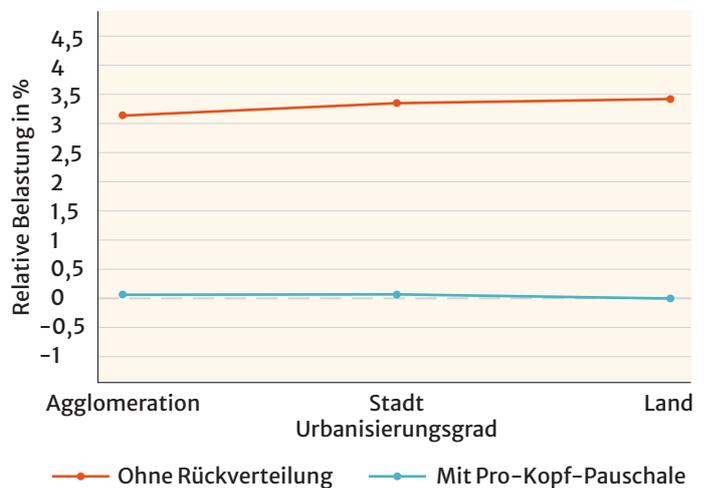


Abbildung 6.2: Jährliche relative Belastung vor und nach einer Pro-Kopf-Rückverteilung nach Urbanisierungsgrad für einen CO₂-Preis von 87 €/t CO₂

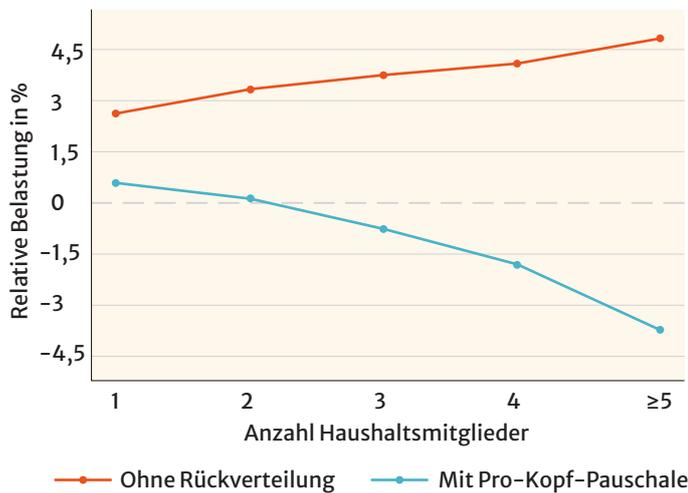


Abbildung 6.3: Jährliche relative Belastung vor und nach einer Pro-Kopf-Rückverteilung nach Haushaltsgröße für einen CO₂-Preis von 87 €/t CO₂

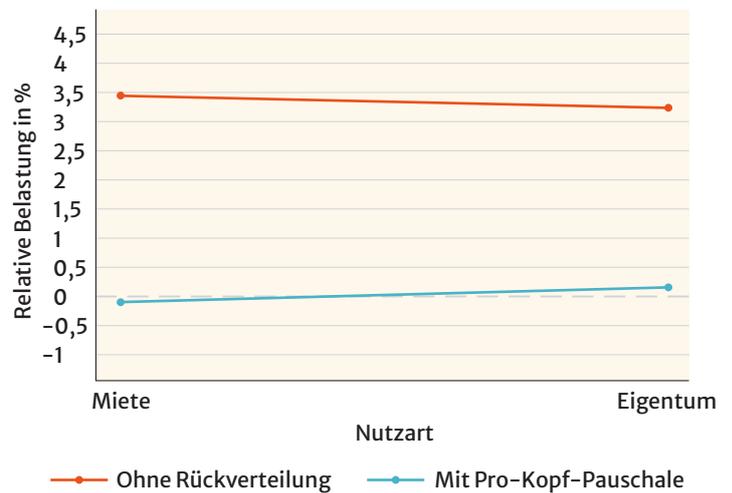


Abbildung 6.4: Jährliche relative Belastung vor und nach einer Pro-Kopf-Rückverteilung nach Nutzart für einen CO₂-Preis von 87 €/t CO₂

Mithilfe einer Pro-Kopf-Pauschale können Haushalte erfolgreich entlastet und ansonsten entstehende Härten abgefedert werden. Da auch die Einnahmen einer CO₂-Bepreisung mit der Höhe des CO₂-Preises zunehmen, verringert eine Pro-Kopf-Pauschale für alle betrachteten Preise die Mehrkosten einer CO₂-Bepreisung maßgeblich. Langfristig gilt es allerdings zu bedenken, dass die CO₂-Emissionen sinken werden und dadurch die Einnahmen aus dem CO₂-Preis über- oder unterproportional zunehmen können, je nachdem, wie stark der Emissionsrückgang im Vergleich zum Anstieg des CO₂-Preises ausfällt. Bei einem unterproportionalen Anstieg der Einnahmen können Haushalte vergleichsweise weniger stark entlastet werden. Je nach Möglichkeit der Haushalte, durch Verhaltensänderungen und Modernisierungen selbst CO₂-Emissionen und somit ihre Kostenlast zu reduzieren, wird es folglich weiterhin Haushalte geben, die stärker belastet werden als andere. Zu diesen Haushalten könnten einerseits einkommensschwache Haushalte zählen, für die es ohne Unterstützung tendenziell schwieriger als für wohlhabende Haushalte ist, Modernisierungen durchzuführen oder ihr Verhalten zu ändern und somit ihre Emissionen zu verringern. Darüber hinaus könnten je nach Entwicklung der Elektromobilität und des Ausbaus des öffentlichen Nahverkehrs auch insbesondere Haushalte auf dem Land betroffen sein.

6.2 Kraftstoffkosten und Luftqualität

Lokale Luftschadstoffe wie Stickoxide (NO_x) und andere nicht-methanorganische Gase (NMOG) stammen hauptsächlich aus dem Straßenverkehr und stellen eine große Gefahr für die Gesundheit dar. Sie sind jährlich für über 70.000 vorzeitige Todesfälle in Deutschland verantwortlich (EEA 2019). Ein großer Teil dieser Schadstoffe entsteht in der sogenannten Kaltstartphase, also in den ersten Minuten des Fahrens, nachdem ein Auto mehrere Stunden stillgestanden hat. Nach Schätzungen von Drozd et al. (2016) kann ein warmgelaufenes Fahrzeug mehr als 300 km weit fahren, bis es genauso viele NMOG-Emissionen ausgestoßen hat wie bei einem einzigen Kaltstart entstehen. Folglich hat die Häufigkeit von Kaltstarts wichtige Auswirkungen auf die Luftqualität und die menschliche Gesundheit, insbesondere in städtischen Gebieten. Die Europäische Kommission betont in ihren Verordnungen zu Emissionen im praktischen Fahrbetrieb (EC 2017) die Dringlichkeit dieses Themas und weist darauf hin, dass Kaltstarts erheblich zur Luftverschmutzung in Städten beitragen und daher angemessen reguliert werden sollten.

Die CO₂-Bepreisung ist eine mögliche Maßnahme zur Verringerung der Emissionen durch Kaltstarts, da sie die Kosten der Autonutzung erhöht. Um dieses Potenzial zu untersuchen, nutzen wir Daten aus Haushaltsbefragungen des Mobilitätspanels, die die Anzahl der täglichen Kaltstarts pro Haushalt sowie den für Benzin gezahlten Preis erfassen. Wir fügen diese Daten in ein ökonometrisches Modell ein, das die Auswirkungen der Kraftstoffpreise auf die Anzahl der Kaltstarts schätzt. Das Modell enthält außerdem mehrere Kontrollvariablen, die den Einfluss sozioökonomischer Merkmale wie den Standort des Haushalts (Stadt oder Land), das Einkommensniveau und die demografische Zusammensetzung erfassen.

Anhand der Modellschätzungen berechnen wir, dass eine Erhöhung des Kraftstoffpreises um 20 Cent pro Liter, die etwas höher ist als die im Rahmen des deutschen Aktionsprogramms Klimaschutz für 2025 geplante Erhöhung des Kraftstoffpreises und die mit ca. 13% dem Minimum der Szenarien in 2025 entspricht, einen Rückgang der Kaltstartemissionen um 3,1% bewirken würde. Abbildung 6.5 zeigt, dass die Auswirkungen auf die absoluten Emissionen räumlich variieren würden. So werden die positiven Auswirkungen auf die Luftqualität in städtischen Gebieten größer sein, wo die Fahrzeugdichte und damit das Potenzial für Kaltstarts höher ist.

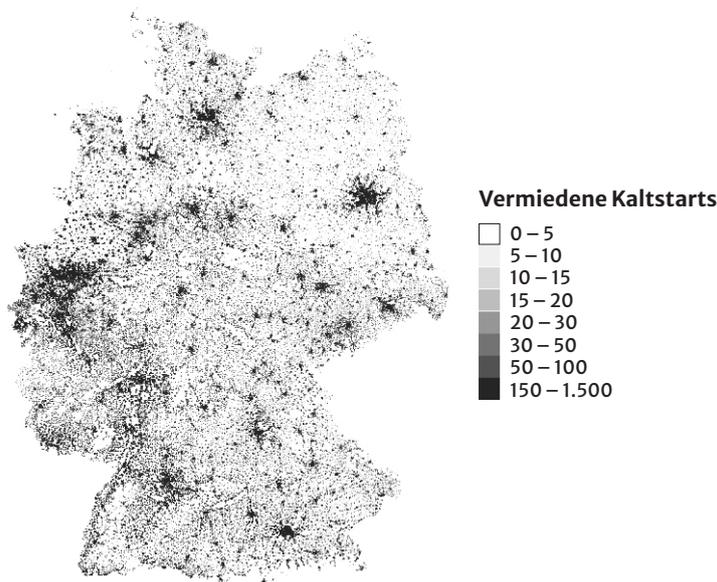


Abbildung 6.5: Anzahl an Kaltstarts (Quelle: Frondel et al. 2021)

6.3 Subventionen für die Ladeinfrastruktur und die Zulassung von Elektrofahrzeugen

Neben der CO₂-Bepreisung spielen auch ordnungspolitische Instrumente wie Verbote und Subventionen eine teils wichtige Rolle in den verschiedenen Szenarien. So zeigt Kapitel 4, dass gezielte Maßnahmen für die rasche Einführung von Elektrofahrzeugen (EVs) entscheidend sind. Ein häufig genanntes Hindernis für die Verbreitung von E-Fahrzeugen ist die unzureichende Abdeckung mit öffentlicher Ladeinfrastruktur. Daher hat die EU das Ziel gesetzt, ein Mindestverhältnis von einem Ladepunkt zu zehn E-Fahrzeugen zu gewährleisten (EC 2014). Aus diesem Grund unterstützt die deutsche Regierung den Ausbau der öffentlichen Ladeinfrastruktur in Form eines Programms, das Zuschüsse für die wettbewerbsfähigsten Angebote zum Bau von Ladestationen vergibt.

In Deutschland gibt es etwa einen Ladepunkt pro fünf E-Fahrzeugen, was weit über dem von der EU empfohlenen Minimum liegt. Um herauszufinden, ob bereits ein Sättigungspunkt erreicht ist oder ob die unzureichende Infrastruktur weiterhin ein Hindernis für die Verbreitung von E-Fahrzeugen darstellt, schätzen wir ein ökonometrisches Panelmodell, das den Effekt von öffentlichen Ladestationen auf die Verbreitung von E-Fahrzeugen quantifiziert. Das Modell unterscheidet dabei zwischen den Auswirkungen von normalen (ca. 22 kW) und Schnellladestationen (ca. 350 kW).

Die Modellergebnisse deuten darauf hin, dass die Ladeinfrastruktur ein verbindlicher Faktor für die Verbreitung von E-Fahrzeugen in Deutschland ist: Jeder zusätzliche normale Ladepunkt ist mit einem Anstieg von etwa 0,06 EVs pro Landkreis und Monat verbunden, während der Effekt eines Schnellladegeräts mit 0,27 EVs mehr als viermal so groß ist. Die entsprechenden Effektgrößen für Hybridfahrzeuge sind etwa halb so groß wie die von E-Fahrzeugen, wahrscheinlich weil sie teilweise von einem Verbrennungsmotor angetrieben werden und daher weniger abhängig von der Ladeinfrastruktur sind.

Wir schätzen außerdem Modelle, die die Heterogenität in der Wirkung von Ladepunkten je nach regionalen und sozioökonomischen Bedingungen berücksichtigen. Diese Schätzungen zeigen, dass der Effekt von normalen und Schnellladestationen in dichter besiedelten Gebieten stärker ist (siehe Abbildungen 6.6 und 6.7). Eine bemerkenswerte Ausnahme von diesem Muster ist die Stadt Berlin, für die der geschätzte marginale Effekt von Schnellladestationen im Wesentlichen Null beträgt. Eine Erklärung für diese Anomalie ist, dass Berlin eine außergewöhnlich hohe Anzahl von Häusern hat, die etwa viermal so hoch ist wie der nationale Durchschnitt, und dadurch der Anteil an Bewohnern, die einen direkten Zugang zu eigenen Ladestationen haben, höher sein dürfte. Daher dürfte die Wirkung öffentlicher Ladestationen schwächer ausfallen.

Aus diesen Ergebnissen folgt, dass die Verbreitung von E-Fahrzeugen durch einen Ausbau der Ladeinfrastruktur beschleunigt werden kann, insbesondere wenn diese regional ausgerichtet ist, um die unterschiedlichen Effekte in ländlichen und städtischen Gebieten zu berücksichtigen.

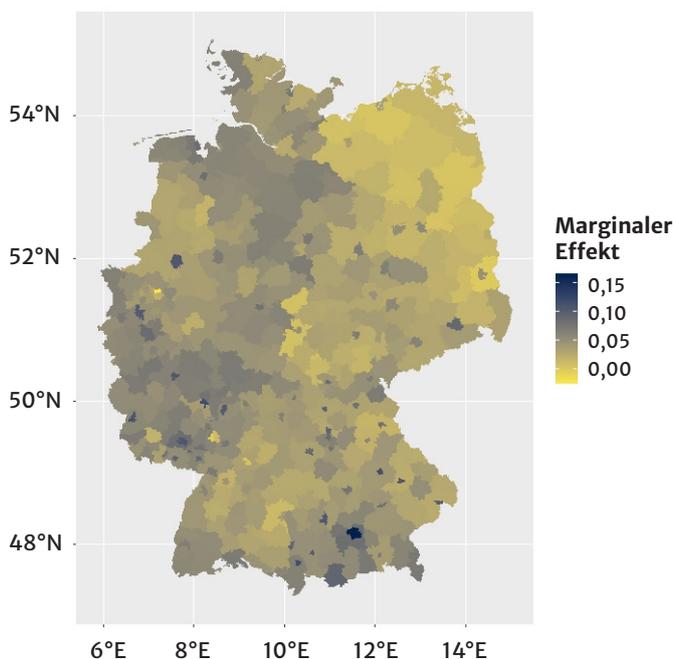


Abbildung 6.6: Wirkung von normalen Ladestationen (Quelle: Sommer and Vance, 2021)

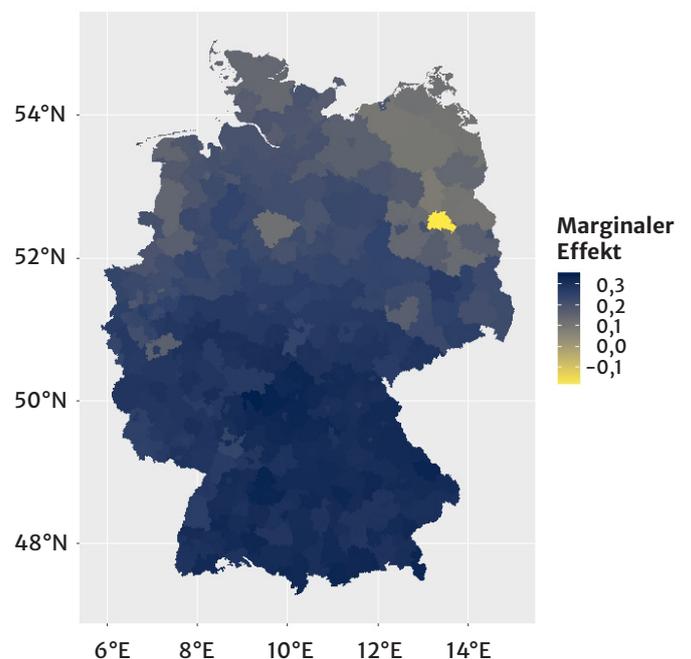


Abbildung 6.7: Wirkung von Schnellladestationen (Quelle: Sommer and Vance, 2021)

7. Synthese und Handlungsbedarf

7.1 Synthese

Während die 5 verschiedenen Szenarien alle das Klimaziel im Jahr 2050 erreichen, so unterscheiden sie sich doch erheblich bezüglich der Schwierigkeiten, die es auf dem Weg dahin zu überwinden gilt. Allen Szenarien ist jedoch gemein, dass sie kurzfristig noch deutlich ambitionierter sind als die derzeitigen Klimaziele der EU vorschreiben. Während die EU in 2030 -55 % THG-Emissionsreduktion anvisiert, erreichen die Szenarien -59 – -63 %. Im Folgenden werden anhand von einer Reihe von Indikatoren (siehe Abbildung 7.1) bestehende Zielkonflikte aufgezeigt, die es ermöglichen die Vor- und Nachteile der Szenarien gegeneinander abzuwägen. Diese Indikatoren müssen allerdings auch gegen weniger gut quantifizierbare Faktoren wie die politische Durchsetzbarkeit und die gesellschaftliche Akzeptanz abgewogen werden.

1) CO₂ Preise: Der benötigte CO₂-Preis kann durch das Zulassen von Technologien mit mangelnder sozialer Akzeptanz wie CCS, durch politisch als unliebsamen empfundene ordnungspolitische Maßnahmen wie ein Verbot von Verbrennern und Öl- und Gasheizungen, oder durch eine Änderung des Konsumverhaltens hin zu einem nachhaltigeren Lebensstil reduziert werden. Falls nichts davon eintritt werden sehr hohe CO₂-Preise von über 450 €/t CO₂ bereits im Jahr 2030 benötigt. Hohe CO₂-Preise führen zu einer substanziellen Kostenbelastung der Haushalte. Darüber hinaus werden einkommensschwache und große Haushalte überproportional belastet. Zwischen Stadt und Land ergeben sich kaum Unterschiede, weder in Bezug auf die Sensibilität gegenüber hohen Kraftstoffpreisen (Fronde et al., 2021) noch in Bezug auf deren Verteilungseffekte. Hinzu kommt allerdings, dass die positiven Auswirkungen der CO₂-Bepreisung, wie bspw. die Verbesserung der Luftqualität durch eine Verringerung der Anzahl von Kaltstarts, geografisch variiert und somit insbesondere Haushalte in der Stadt gesundheitlich profitieren. Nichtsdestotrotz hat ein CO₂-Preis den Vorteil, dass dabei Einnahmen generiert werden, die zur Rückverteilung an Haushalte und damit zur Abschwächung der Verteilungswirkungen genutzt werden können. Dies steht im Gegensatz zu ordnungsrechtlichen Sektorpolitiken, die ebenfalls zum Teil ungleiche Kostenbelastungen hervorrufen, aber keine Einnahmen generieren, die zur Kostenentlastung der Haushalte genutzt werden können. CO₂-Preise machen die Vermeidungskosten für Verbraucher und Unternehmen transparent und schaffen so einen Anreiz in die Vermeidung von Emissionen zu investieren. Unterm Strich lassen sich die gesamtwirtschaftlichen Vermeidungskosten nur dann verringern, wenn zusätzliche Politikmaßnahmen wie die Förderung neuer Technologien oder Technologiestandards bestehendes Marktversagen verringern statt neue Ineffizienzen zu schaffen.

Durch eine Pro-Kopf-Pauschale kann die regressive Verteilungswirkung eines CO₂-Preises umgekehrt werden und alle Haushalte entlasten. Einkommensschwache und große (>2 Personen) Haushalte würden sogar netto gewinnen. Mit geringeren CO₂-Emissionen in der Zukunft sinken trotz steigender CO₂-Preise auch die Einnahmen, welche an die Haushalte zurück verteilt werden können. Je nach Möglichkeit der Haushalte, selbst CO₂-Emissionen zu reduzieren, wird es folglich weiterhin Haushalte geben, die stärker belastet werden als andere. Während in den betrachteten Szenarien mit einem starken Fokus auf CO₂-Preisen hohe Kostenbelastungen auf alle Haushalte zukommen und die Rückverteilung eine entscheidende Rolle für die Sozialverträglichkeit spielt, ist selbst in Szenarien mit niedrigeren CO₂-Preisen die Rückverteilung entscheidend, um die bereits bei niedrigen Preisen vorliegende ungleiche relative Kostenbelastung zwischen einkommensschwachen und wohlhabenden Haushalten abzuschwächen. Auch wenn die Kostenbelastung bei niedrigen CO₂-Preisen geringer ausfällt, ergibt sich in diesen Szenarien ein Zielkonflikt in der Einnahmenverwendung: In Szenarien mit niedrigen CO₂-Preisen werden die Emissionsreduktionen u.a. durch Technologien wie der Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre erreicht, die ebenfalls finanziert werden müssen. Dadurch steht weniger Geld für die Rückverteilung an Haushalte zur Verfügung als bei höheren CO₂-Preisen und die regressiven Verteilungswirkungen können dann nicht vollständig umgekehrt werden.

2) Verbraucherpreise: Viele Verbraucherpreise sind stark an die CO₂-Preise gekoppelt. So kommt es ohne flankierende Sektorpolitiken bei gleichzeitigem Ausschließen von Technologien mit Akzeptanzbedenken (S4) bereits bis 2030 zu einer Erhöhung der Benzinpreise um fast 75 % im Vergleich zu 2020, die Zielkonflikte sind entsprechend dieselben wie beim CO₂-Preis. Allerdings können höhere Kraftstoffpreise – insbesondere in dicht besiedelten Gebieten – zu einer erheblichen Verbesserung der lokalen Luftqualität und Gesundheit führen. Strompreise sind zwar weniger stark mit dem CO₂-Preis korreliert, bereits bis 2025 sind hier Preissteigerungen zwischen 25 % und 40 % möglich⁷. Dennoch führt auch hier insbesondere das Zulassen von Technologien zur CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre sowie von Bioenergie-Technologien zu einem verringerten Strompreis. Ebenso ist dies allerdings durch eine Verhaltensänderung in der Bevölkerung hin zu einem nachhaltigeren Lebensstil möglich, da hier die Energienachfrage sinkt. Die Agrarpreise hingegen werden in erster Linie durch Steuern und die Nachfrage von tierischen Erzeugnissen getrieben und steigen bei einer gleichbleibenden Agrarnachfrage insbesondere durch die Bepreisung von Emissionen in der Landwirtschaft bis 2050 um etwa 50 % an. Nur durch eine umfassende Änderung des Lebensstils in der Bevölkerung bleiben die Agrarpreise im Laufe der Zeit konstant, da ein wesentlich geringerer Anteil der landwirtschaftlichen Produktion aufgrund von niedrigeren THG-Emissionen von der Steuerpolitik erfasst wird.

3) Energie: Zur Erreichung der Klimaziele steigt die Stromnachfrage stark an, während die Nachfrage nach Flüssigkraftstoffen und Gas sinkt. Dadurch wird auch der Ausbau der erneuerbaren Energien massiv erhöht. Die durchschnittliche jährliche Ausbaurate von Windenergie in der EU müsste um etwa 500 – 600 % im Vergleich zu 2020 steigen um den hohen Strombedarf zu decken. Es ist jedoch möglich den Anstieg des Strombedarfs von mehr als 150 % bis 2050 auf ca. 60 % zu reduzieren, indem stattdessen stark auf Bioenergie in Kombination mit CCS gesetzt wird, während gleichzeitig die Elektrifizierung des Transportsektors weniger ambitioniert vorangetrieben wird, bzw. nicht durch gezielte Politiken unterstützt wird. Ein Vorteil der schnelleren und ambitionierten Elektrifizierung ist jedoch die Verringerung der Abhängigkeit von Öl- und Gas-Importen.

4) CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre: Keiner der gezeigten Transformationspfade kommt ohne CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre aus. Restemissionen in 2050 liegen im Bereich zwischen 540 und 1080 MtCO₂-eq/a; um THG-Neutralität zu erreichen müssen diese durch CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre ausgeglichen werden. Um diese Restemissionen von 1080 auf 540 MtCO₂-eq/a zu reduzieren und damit die Abhängigkeit von CO₂-Entnahme zu verringern, ist insbesondere eine stärkere Elektrifizierung der Nachfrage und damit hohe Stromausbauraten nötig (siehe vorheriger Abschnitt). Wird auf gezielte Sektorpolitiken zur schnellen Elektrifizierung verzichtet, ist neben der hohen Stromausbauraten auch noch ein sehr hoher CO₂-Preis mit entsprechender Verteilungswirkung erforderlich, um die Nutzung von CO₂-Entnahme-Technologien zu minimieren. Vorteile einer Strategie, die auf wenig CO₂-Entnahme setzt, sind ein fast dreimal geringerer Flächenverbrauch für den Anbau von Biomasse mit potentiell negativen Umweltwirkungen und weniger CCS.

5) Umweltwirkungen: Die Bepreisung von CO₂ aus Landnutzungsänderungen kann in allen Szenarien die Umwandlung von kohlenstoffreichen Biomen (z.B. Wäldern) in Ackerland wirksam verhindern. Der Rückgang der Nachfrage nach tierischen Produkten im verhaltensorientierten Szenario (S2) führt zu einem Rückgang der Weideflächen. Diese frei werdenden Flächen werden teilweise in Ackerland umgewandelt, was eine nachhaltige Extensivierung der landwirtschaftlichen Produktion ermöglicht.

⁷ Die höchsten Strompreise sind im Jahr 2025 zu beobachten, da die Transformation des Stromsektors bis 2030 in allen Szenarien bereits größtenteils abgeschlossen ist und die Preise anschließend wieder sinken. Daher werden Strompreise zur besseren Bewertung der Transformationspfade immer für das Jahr 2025 gezeigt.

Gleichzeitig ist die Verringerung des Viehbestands die einzige Möglichkeit, CH₄-Emissionen deutlich zu reduzieren. Das Gleiche gilt für die Emissionen von Stickstoffverbindungen (N-Emissionen) aus der Landwirtschaft, die durch eine Änderung der Ernährungsgewohnheiten erheblich reduziert werden können. Aber auch eine höhere Produktionseffizienz im Agrarsektor – angetrieben durch Sektorpolitiken – führt zu einer leichten Absenkung der N-Emissionen. Die Wirkung ist insbesondere bei den NO₃-Emissionen und der damit verbundenen Ausschwemmung von Stickstoff in Süßwasser stärker, wodurch die Umweltschäden in den sektorspezifischen Szenarien ebenfalls erheblich reduziert werden (S1 – 3 vs. S4,S5). Bezüglich der Bewässerung in der Landwirtschaft zeigt sich, dass gezielte sektorale Maßnahmen, die auf eine höhere Effizienz und Präzision der Bewässerung auf Ackerland abzielen, den Wasserbedarf deutlich reduzieren können (im Jahr 2050 im Vergleich zu 2020 um ~35 % in S1 und S3). Eine Änderung der Ernährungsgewohnheiten (S2) hingegen reduziert die Wasserentnahme darüber hinaus nur wenig. Neben der Verhaltensänderung sind somit die sektoralen Maßnahmen auch wirksam bei der Verringerung von Umweltkonflikten mit landwirtschaftlichen Produktionssystemen.

6) Gesundheit: Der Übergang zu einer ausreichenden und nachhaltigen Ernährung mit einem klimabewussten Lebensstil kann sich tiefgreifend auf die allgemeine Gesundheit der Bevölkerung auswirken. Weniger Verzehr von tierischem Eiweiß und mehr Obst, Gemüse, Hülsenfrüchte und Nüsse reduzieren Emissionen und bekämpfen gleichzeitig Überernährung und Obesität. Die Prävalenz der übergewichtigen Bevölkerung im verhaltensorientierten Ansatz (S2) wird bis 2050 auf Null reduziert, wie es in den Empfehlungen der EAT-Lancet-Kommission für gesunde Ernährung vorgesehen ist. Auch wenn diese Änderung der Ernährungsgewohnheiten freiwillig erfolgt, könnten die politischen Akteure Mechanismen zur Förderung eines klimafreundlichen Konsums von Einzelpersonen entwickeln, z.B. durch die Subventionierung sauberer Alternativen zu Produkten mit einem größeren ökologischen Fußabdruck oder durch gezielte Information, beispielsweise eine Kennzeichnung des CO₂-Fußabdrucks von Lebensmitteln. Zusätzlich werden die Süßwasser- und Grundwasserressourcen von Nitratbelastung aus der Düngung von Ackerflächen befreit, wenn die Nachfrage in der Landwirtschaft gesenkt wird (S2) oder wenn eine höhere Effizienz und Präzision bei der Zuführung von Betriebsmitteln zur landwirtschaftlichen Produktion gewährleistet ist (S3, S5).

Die Luftverschmutzung durch SO₂, Feinstaub und NO_x wird in allen Szenarien deutlich reduziert. Die NO_x Belastung kann durch den höheren Anteil von Elektromobilität in Szenarien mit Sektorpolitiken noch einmal deutlich gesenkt werden.

Transformations-Indikatoren

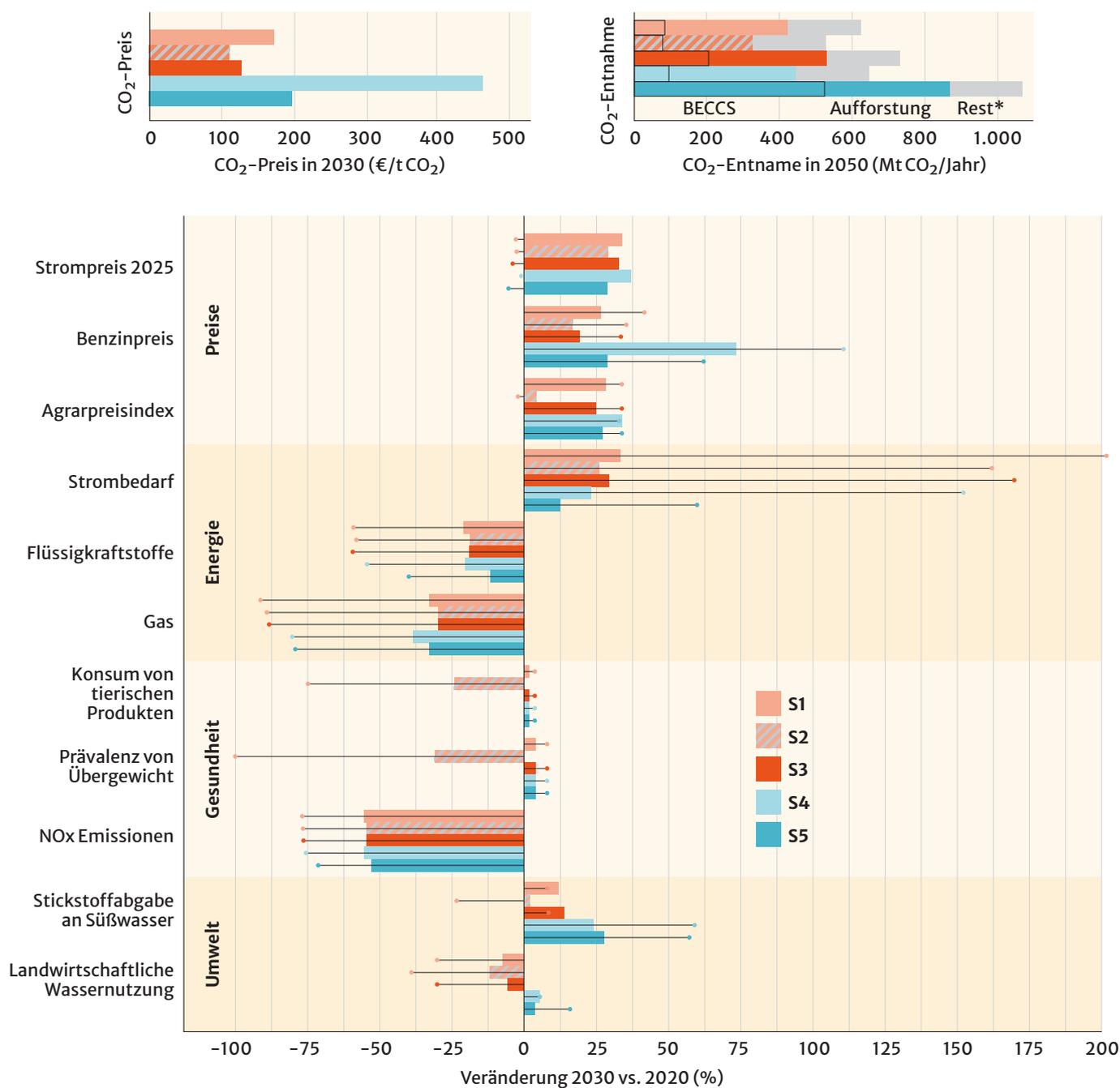


Abbildung 7.1: Transformations-Indikatoren für alle 5 Szenarien. In der unteren Grafik entsprechen die farbigen Balken der prozentualen Veränderung zwischen 2020 und 2030, während die Punkte die Veränderung zwischen 2020 und 2050 zeigen. Der Strompreis stellt eine Ausnahme dar, hier steht der Balken für die Veränderung zwischen 2020 und 2025, da die Strompreise im Jahr 2025 höher sind als im Jahr 2030 (siehe Kapitel 7a, Abschnitt Verbraucherpreise).

*Die grauen Balken („Rest“) in der Abbildung zur CO₂-Entnahme sind unkompenzierte Restemissionen von 200 Mt CO₂-äq/a, d.h. die Szenarien erreichen nicht vollständige THG-Neutralität im Jahr 2050 (siehe Kapitel 2, Abschnitt Klimaziel und Rahmenbedingungen).

7.2 Politischer Handlungsbedarf

- **Preissignale setzen:** Die Lenkungswirkung des CO₂-Preises ist entscheidend für eine effiziente und tiefgreifende Emissionsminderung. Der CO₂-Preis liegt in dieser Studie in 2030 mindestens bei 108 €/t CO₂, kann aber bei begrenzter Technologieverfügbarkeit, ohne flankierende Sektorpolitiken und ohne Änderung des Konsumverhaltens auf über 450 €/t CO₂ ansteigen.

- **Die CO₂-Bepreisung durch Sektorpolitiken unterstützen:** gezielte ordnungsrechtliche Maßnahmen in Bereichen, die weniger sensibel auf Preissignale reagieren, können den notwendigen CO₂-Preis deutlich senken und gleichzeitig die Planungssicherheit erhöhen. Im Transportsektor wäre ein sehr hoher CO₂-Preis nötig, der mit entsprechenden Verteilungswirkungen einhergehen würde. Dabei müssen die politische Durchsetzbarkeit dieser Maßnahmen und potentiell höhere gesamtwirtschaftliche Vermeidungskosten abgewogen werden gegen sehr hohe CO₂-Preise, die mit entsprechenden Verteilungswirkungen einhergehen. Allerdings verursachen auch ordnungsrechtliche Maßnahmen Kosten, die sozial gerecht verteilt werden müssen. Eine konsequentere direkte Elektrifizierung, wie sie beispielsweise durch ein Verbot von Verbrennungsmotoren und fossilen Gebäudeheizungen erfolgen würde, würde die EU unabhängiger machen von Importen fossiler Energien. Das erfordert aber sowohl die Durchsetzung möglicherweise unpopulärer Maßnahmen, als auch den konsequenten Ausbau erneuerbarer Energien.
- **Infrastruktur schaffen:** Der Umstieg auf erneuerbare Energien und eine stärkere direkte Elektrifizierung erfordern große Investitionen in Infrastruktur wie den Stromnetzausbau, Ladeinfrastruktur für Elektromobilität, Ausbau von Stromspeichern, Netze für den Transport von Wasserstoff und von CO₂, Ausbau des ÖPNV. Mit einer geografisch differenzierten Ausrichtung kann die Effektivität der Förderung von Ladestationen deutlich verbessern. Zugleich begünstigt eine bessere Infrastruktur und bessere Informationen wie ein CO₂-Fußabdruck labelling bei Nahrungsmitteln die Änderung des Konsumverhaltens, die einen großen Einfluss auf die Herausforderungen der Transformation hat.
- **Europäische Strategie für CO₂-Entnahme erarbeiten:** Um THG-Neutralität zu erreichen ist es erforderlich, die verbleibenden Restemissionen durch die Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre auszugleichen. In dieser Studie sind 540 – 1080 Gt CO₂/Jahr CO₂-Entnahme in 2050 nötig, wobei Sektorpolitiken und eine Änderung des Konsumverhaltens zu niedrigeren Bedarfen führen. Um diese Mengen zu erreichen sollte zeitnah ein breites Portfolio an Methoden entwickelt werden. Dazu sollte Forschung und Entwicklung gefördert werden, die gesetzlichen Rahmenbedingungen geschaffen werden die Entwicklung und Einsatz von CO₂-Entnahme anreizen, und gesellschaftliche Akzeptanz gefördert werden. Die Verfügbarkeit von CCS spielt dabei eine wichtige Rolle, um sowohl unvermeidbare Restemissionen z.B. aus Industrieprozessen zu vermeiden, als auch für technische Optionen der CO₂-Entnahme. Ohne CCS muss mit doppelt so hohen CO₂-Preisen gerechnet werden. Eine europäische Kooperation und die Offshore Speicherung kann hier Barrieren reduzieren.
- **Klimafreundliches Konsumverhalten unterstützen:** Veränderte Ernährungsgewohnheiten mit weniger tierischen Produkten und damit einhergehend eine Verringerung des Viehbestands ist die einzige Möglichkeit, verbleibende CH₄- und N₂O-Emissionen und damit die Abhängigkeit von CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre deutlich zu reduzieren. Zudem sinkt der Energiebedarf und damit die Verbraucherpreise, und es ergeben sich positive Effekte auf Umwelt und Gesundheit. Ein solches Konsumverhalten kann durch geeignete Informationen wie z.B. eine Kennzeichnung des CO₂-Fußabdrucks von Produkten unterstützt werden.
- **Transformation sozialverträglich gestalten:** Da eine CO₂-Bepreisung ohne Rückverteilung regressiv wirkt und einkommensschwache und größere Haushalte relativ gesehen stark belastet, ist eine Rückverteilung wichtig, um soziale Härten abzufedern. Eine Pro-Kopf-Pauschale kehrt erfolgreich die regressivere Verteilungswirkung in eine progressive Verteilungswirkung um. Dies ist ein Vorteil im Vergleich zu Verboten, welche ebenfalls häufig zu ungleichen Belastungen führen, aber keine Einnahmen für eine Rückverteilung generieren. Langfristig werden die Einnahmen aus dem CO₂-Preis nicht proportional mit höheren CO₂-Preisen steigen, da die gesamten CO₂-Emissionen sinken und voraussichtlich einkommensschwache Haushalte weniger Spielraum haben, selbst Emissionen einzusparen und somit stärker belastet werden als wohlhabende Haushalte. Eine gezielte Förderung zur Unterstützung einkommensschwacher Haushalte bei der Durchführung von Energieeffizienzmaßnahmen könnte daher helfen.

Annex

Stellschrauben

Die Tabelle zeigt die in den Szenarien genutzte Stellschrauben für die EU+UK. Der Rest der Welt hat keine Beschränkungen der Technologien, keine spezifischen Sektorpolitiken und keine Verhaltensänderung, d.h. die Emissionsminderung ist dort rein CO₂-eq-Preis getrieben.

Technologie & Innovation

	Fokus THG-Minderung	Fokus Akzeptanz
CCS	Maximal 750 Mt CO ₂ /a, DAC erlaubt	Maximal 150 Mt CO ₂ /a, kein DAC
Bioenergie	Keine Exporte, sonst keine Beschränkungen	Nur Reststoffe + maximal 2 EJ/a, keine Exporte und Importe
Kernenergie	Keine Beschränkungen	Keine neuen Investitionen nach 2020
Windenergie	Keine Beschränkungen	fehlende Akzeptanz führt zu höheren Ausbaurkosten

Koordination

	Sektororientiert	Markorientiert
Industrie	<ul style="list-style-type: none"> - Förderung von direkter Elektrifizierung durch Subventionen des Strompreises - Förderung von indirekter Elektrifizierung durch Subventionen der Wasserstoffproduktion 	Nur CO _{2eq} -Preis getrieben
Gebäude	- Verbot von Kohle-, Öl- und Gasheizungen bis 2050	Nur CO _{2eq} -Preis getrieben
Transport	<ul style="list-style-type: none"> - Gezielte Förderung der Elektromobilität führt insbesondere zu einer deutlich schnelleren Einführung von Elektroautos - Verbot des Verkaufs neuer Verbrenner ab 2030 	Nur CO _{2eq} -Preis getrieben
Land	<ul style="list-style-type: none"> - Precision Agriculture: Erhöhung der Effizienz der Stickstoffnutzung & Bewässerungswassernutzung - Methanpille: Reduktion von Methanemissionen Rinder - Preisgrenze für CH₄ und N₂O Emissionen 	Nur CO _{2eq} -Preis getrieben

Verhaltensänderung

	Wertorientiert	Markorientiert
Gebäude	- Bewusster Lebensstil führt zu einer geringeren Endenergie-Nachfrage	Nur CO _{2eq} -Preis getrieben
Transport	<ul style="list-style-type: none"> - Modal Shift hin zu mehr Bus, Bahn, Rad - verringerte Anzahl von Personen-Kilometern und reduzierter Konsum führen zu geringer Endenergie-Nachfrage 	Nur CO _{2eq} -Preis getrieben
Land	<ul style="list-style-type: none"> - EAT-Lancet diet - Geringere Nahrungsmittelabfälle 	Nur CO _{2eq} -Preis getrieben

Tabelle A1: Liste aller Stellschrauben.

THG-neutrale Szenarien

Die beiden Szenarien mit eingeschränkter Technologieverfügbarkeit und preisorientiertem Verhalten S1 und S4 können THG-Neutralität in 2050 nicht erreichen, da nicht genügend CO₂-Entnahme zur Verfügung steht, um die verbleibenden Restemissionen insbesondere von CH₄ und N₂O zu kompensieren. Um THG-Neutralität zu erreichen muss also mindestens einer der beiden Ansätze Verhaltensänderung oder mehr CO₂-Entnahme verfolgt werden.

In 2030 unterscheiden sich die THG-neutralen Szenarien (*S2, *S3, *S5) nur wenig, alle reduzieren die Emissionen ähnlich wie die Szenarien mit 200 Mt CO₂äq Restemissionen deutlich über das -55% Ziel hinaus (Abbildung S1). In 2050 müssen in dem Szenario mit eingeschränkter Verfügbarkeit von CO₂-Entnahme *S2 die Restemissionen weiter gesenkt werden, insbesondere im Transportsektor. Das geht mit einer deutlichen Erhöhung des CO₂-Preises um über 70% von 110 €/t CO₂ auf 190 €/t CO₂ in 2030 einher. In S3 hatten die Sektorpolitiken schon für eine Reduktion der Restemissionen und damit weniger Bedarf an CO₂-Entnahme gesorgt. Im THG-neutralen Szenario *S3 wird nun die CO₂-Entnahme, hauptsächlich BECCS, erhöht, die Restemissionen ändern sich nur wenig und der CO₂-Preis steigt von 125 €/t CO₂ auf 160 €/t CO₂ in 2030. Im Gegensatz dazu hatte S5 mehr Restemissionen zugelassen, die durch hohe CO₂-Entnahmen ausgeglichen werden. Da nicht noch mehr CO₂-Entnahme zur Verfügung steht, müssen auch in *S5 die Restemissionen insbesondere in Industrie- und Transportsektor gesenkt werden um THG-Neutralität zu erreichen. Der CO₂-Preis steigt von 194 €/t CO₂ auf 229 €/t CO₂ in 2030.

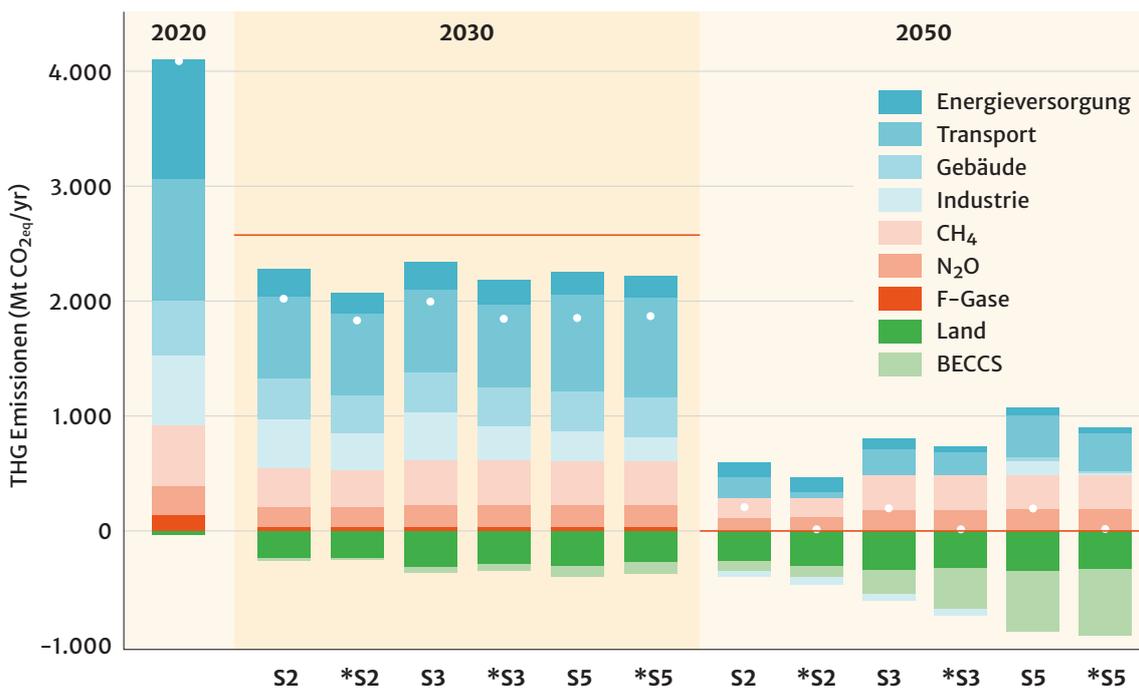


Abbildung S1: THG Emissionen in Europa in 2030 und 2050 für alle drei THG-neutralen Szenarien (*Sx) und die zugehörigen Szenarien mit 200 Mt CO₂äq/yr Restemissionen (Sx) in 2050. Weiße Punkte markieren die netto Gesamtemissionen, rote Linien zeigen die EU-Ziele.

Allen Szenarien ist gemeinsam, dass sie deutlich mehr Biomasse nutzen, entweder um BECCS auszubauen, oder um die Restemissionen in Industrie und Verkehr durch Biokraftstoffe zu reduzieren (Abbildung S2). Abbildung S3 zeigt die Transformations-Indikatoren für die drei THG-neutralen Szenarien analog zu Abbildung 7.1.

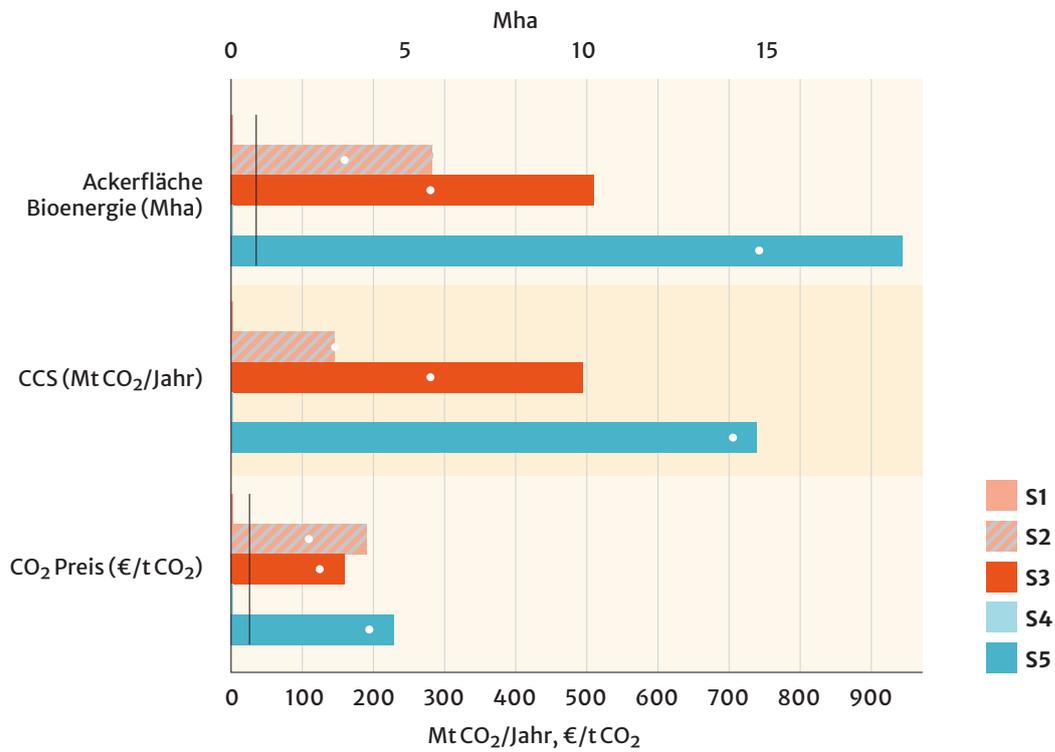


Abbildung S2: Zielkonflikte zwischen Ackerfläche für Bioenergie und CCS in 2050 in Europa einerseits und CO₂-Preisen in 2030 andererseits für alle drei THG-neutralen Szenarien *S2, *S3, *S5. Die schwarzen Linien zeigen die jeweiligen Werte in 2020, die weißen Punkte indizieren die Werte der Szenarien mit 200 Mt CO₂-Äq/a Restemissionen S2, S3, S5 wie in Abbildung 3.2 gezeigt.

Transformations-Indikatoren

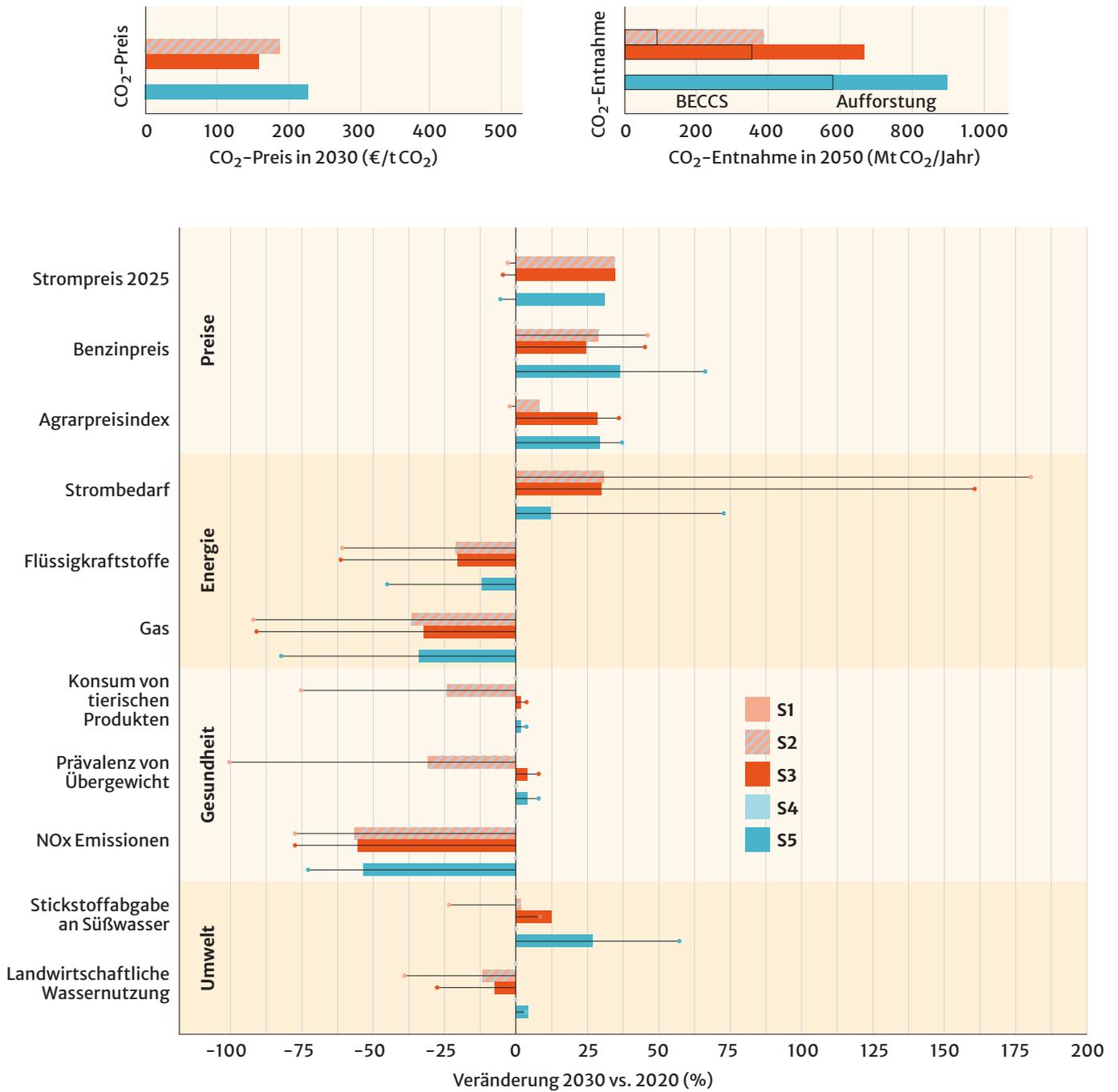


Abbildung S3: Transformations-Indikatoren für alle drei THG-neutralen Szenarien. In der unteren Grafik entsprechen die farbigen Balken der prozentualen Veränderung zwischen 2020 und 2030, während die Punkte die Veränderung zwischen 2020 und 2050 zeigen. Der Strompreis stellt eine Ausnahme dar, hier steht der Balken für die Veränderung zwischen 2020 und 2025, da die Strompreise im Jahr 2025 höher sind als im Jahr 2030 (siehe Kapitel 7a, Abschnitt Verbraucherpreise).

Modellbeschreibung

REMIND

Beschreibung und Kernannahmen: REMIND ist ein globales multi-regionales Allgemeines Gleichgewichtsmodell des Ökonomischen Wachstums (Baumstark et al., 2021) und open source verfügbar (Luderer et al., 2020). REMIND hat eine detaillierte Abbildung des Energiesektors, hart-gekoppelt an den makroökonomischen Kern des Modells. Es umfasst 12 unabhängige Welt-Regionen mit der EU27+UK als eigenständiger ökonomischer Region, welche im Fokus dieser Studie steht. Das Modell nimmt an, dass ökonomische Akteure (d.h. insbesondere private und staatliche Investoren) perfekte Voraussicht haben. So werden beispielsweise zukünftige Preisentwicklungen – insbesondere die Höhe des CO₂-Preises – antizipiert. Unter der Prämisse, dass bestimmte Klimaziele erreicht werden (hier Restemissionen von 200 Mt CO₂-eq/a für Europa im Jahr 2050, sowie global das 1,5°-Ziel), bestimmt REMIND ein intertemporales Pareto-Optimum der globalen Wohlfahrt. Das heißt, dass es sich bei den verschiedenen Szenarien nicht um Zukunftsprojektionen handelt, sondern um mögliche optimale Transformationspfade basierend auf einer Vielzahl von Grundannahmen.

Zur Erreichung des Klimaziels kann auf eine breite Palette unterschiedlicher Technologien für die Energieumwandlung von Primärenergie in Nutzenergie in den Endverbrauchssektoren zugegriffen werden. Dabei ist der Energiesektor unterteilt in die detailliert abgebildeten Endverbrauchssektoren Gebäude, Industrie und Transport, sowie den Stromsektor. Primärenergieträger können international gehandelt werden. Zur Bestimmung von Bioenergie-Preisen, sowie zum Abbilden der Emissionen aus der Landwirtschaft ist REMIND an das Landnutzungsmodell MAgPIE gekoppelt (siehe unten).

Zusätzlich zu Technologien zur Energieerzeugung und -umwandlung gibt es Technologien zur CO₂-Abscheidung und Nutzung (z.B. zur Herstellung von synthetischen Kraftstoffen), sowie die Option zur CO₂-Speicherung, d.h. negative Emissionstechnologien, insbesondere Bioenergie mit CO₂-Abscheidung und -Speicherung (BECCS) und Luftfilter mit CO₂-Speicherung (DACCS).

Systemgrenzen/Limitationen: Da es sich bei REMIND um ein globales Modell handelt, ist die räumliche Auflösung begrenzt und die Dynamik einzelner Länder aus der Region EU+UK wird nicht abgebildet. Modellergebnisse wie Nachfrage, Preise und Emissionen sind somit Mittel- bzw. Gesamtwerte für die gesamte Region EU+UK. Dies ist insbesondere wichtig im Hinblick auf die Verteilungseffekte, die sich aus den Szenarien ergeben, da diese explizit für Deutschland berechnet werden, aber auf der Preisentwicklung der ganzen EU basieren.

Des Weiteren wird der Handel von Sekundär- und Nutzenergieträgern nicht abgebildet. So kann in den Szenarien Europa beispielsweise keinen Wasserstoff importieren.

Weiterhin wird angenommen, dass die politischen Maßnahmen, die im Rahmen der verschiedenen Szenarien in der EU umgesetzt werden, den Rest der Welt nicht direkt beeinflussen. So wird in anderen Ländern beispielsweise nicht auf die Elektrifizierungspolitik reagiert, was dazu führt, dass in bestimmten Szenarien z.B. die EU bereits einen sehr hohen Anteil von E-Autos hat, während Länder wie die USA und China noch größtenteils auf Verbrenner setzen. Das wiederum beeinflusst die europäische Transformation über Weltmarktpreise von Primärenergieträgern.

MAgPIE

Beschreibung und Kernannahmen: MAgPIE (Modell der landwirtschaftlichen Produktion und deren Folgen für die Umwelt) ist eine modular aufgebaute open-source Rahmenstruktur für die Modellierung von globalen Landsystemen (Dietrich et al. 2019). Diese Rahmenstruktur kombiniert ökonomische und biophysikalische Methoden um eindeutig räumlich globale Szenarien für das 21. Jahrhundert und den jeweiligen Interaktionen mit der Umwelt zu simulieren. MAgPIE bietet eine ganzheitliche Rahmenstruktur um zukünftige Transformationspfade des Landsystems zu untersuchen. Dabei werden diverse Zielkonflikte zwischen Ökosystemdienstleistungen und nachhaltiger Entwicklung berücksichtigt.

MAGPIE ist ein globales Landsystemmodell mit flexibler räumlicher Auflösung auf zwei verschiedenen räumlichen Ebenen: 1) Weltregionen welche auf jeglicher Basis von aggregierten Ländern definiert werden können und 2) räumliche Cluster welche durch ähnliche lokale Eigenschaften (basierend auf Inputdaten über ein $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ räumliches Raster) identifiziert werden. MAGPIE integriert regionale wirtschaftliche Gegebenheiten, so wie Nachfrage für landwirtschaftliche Produkte, technische Entwicklung und Produktionskosten, aber auch räumliche Clusterdaten über potenzielle Getreideerträge. Darüber hinaus werden Kohlenstoffbudgets und Wasserverfügbarkeiten von einem globalen, in Raster aufgeteilten, Getreide-, Vegetations- und Hydrologie Modell LPJmL unter derzeitigen und zukünftigen klimatischen Konditionen berücksichtigt.

MAGPIE ist ein partielles Gleichgewichtsmodell des landwirtschaftlichen Sektors mit rekursiver-dynamischer Optimierung. Die nichtlineare Zielfunktion von MAGPIE repräsentiert die Sättigung von landwirtschaftlicher Nachfrage für definierte Weltregionen bei globaler Kostenminimierung unter Berücksichtigung von biophysikalischen und sozio-ökonomischen Nebenbedingungen. Landwirtschaftliche Nachfrage wird iterativ an MAGPIE Preisschocks angepasst. Hauptkostentypen sind in MAGPIE Faktorankosten (die Summe von Kapital, Arbeit, Dünger), Bewässerungskosten mit einhergehenden Investitionskosten für die Entstehung von neuer Bewässerungsinfrastruktur, Landumwandlungskosten, Transportkosten zu dem nächsten Markt, Investitionskosten für ertrags erhöhenden technologischen Wandel (TC) und Kosten für Treibhausgasemissionen unter Klimaschutzszenarien.

MAGPIE ordnet Landnutzung zur konkurrierenden Nachfrage für Güter, Futter, Kohlenstoffspeicherung, Natur- und Umweltschutz zu. Landnutzung ist grob unterteilt in Ackerfläche, Wald, Weideland und anderes natürliches Land. Regionaler Nahrungsmittelenergiebedarf ist für die exogen gegebene Bevölkerung in 25 Nahrungsmittelenergiekategorien, basierend auf regionalen Ernährungstrends, definiert. Zukünftige Trends für Lebensmittelbedarf sind aus länderübergreifenden Regressionen hergeleitet. Diese basieren auf zukünftigen Szenarien für das BIP, Bevölkerungswachstum, demografische Strukturen und anthropometrischen Eigenschaften. MAGPIE erhält für verschiedene Klimaszenarios räumlich genaue Daten über potenzielle Ernteerträge, Land- und Wasserrestriktionen von LPJmL und kombiniert es mit Informationen über technologische Entwicklung und Produktionskosten. MAGPIE bindet landwirtschaftlichen Handel unter Berücksichtigung von verschiedenen Stufen wirtschaftlicher Unabhängigkeit ein. Das Modell berechnet die folgenden AFOLU Treibhausgasemissionen: CO_2 resultierend aus Landnutzungsveränderungen (beinhaltet die Veränderung im Boden und in den pflanzlichen Kohlenstoffspeichern), CH_4 resultierend aus enterischer Fermentation, Weidelandmanagement und Reiskultivierung, und N_2O ⁸ resultierend aus der Düngung von landwirtschaftlichen Böden. MAGPIE enthält ein voll dynamisches und endogenes Budget des landwirtschaftlichen Stickstoffkreislaufs.

Das Modell enthält eine Auswahl an Politikmaßnahmen, die zur Erreichung verschiedener Nachhaltigkeitsziele dienen können. Diese beinhalten: 1.- und 2.-Generation Bioenergie, Preise von Treibhausgasemissionen von Landnutzungsveränderungen (CO_2) und landwirtschaftlichen Landnutzungen (CH_4 , N_2O), Landnutzungsregulierungen, REDD+ Maßnahmen, Aufforstung, Umweltmanagementschutz, landwirtschaftliche Handelspolitik.

MAGPIE kann mit REMIND gekoppelt werden. Die Modelle sind über den Austausch von Treibhausgaspreisen und der Nachfrage nach Bioenergie von REMIND zu MAGPIE und über AFOLU Treibhausgasemissionen und Bioenergiepreisen von MAGPIE zu REMIND verbunden.

⁸ Die Stickstoffemissionen aus landwirtschaftlichen Böden werden auf der Basis der IPCC 2006 Tier 1-Methode berechnet. Bei dieser Methode wird nicht zwischen den verschiedenen Bodeneigenschaften, die N_2O -Emissionen abgeben, unterschieden, sondern ein einziger Emissionsfaktor für alle Bodentypen angewendet. Diese Methode wurde vor kurzem für die Berechnung von NO_2 -Gas aus Böden in Deutschland aktualisiert und verfeinert, was zu differenzierten Emissionsfaktoren und einer Verringerung der geschätzten jährlichen NO_2 -Emissionen um durchschnittlich 38 % führte. Diese Methodik ist derzeit nicht in MAGPIE enthalten.

Systemgrenzen/Limitationen: Die wirtschaftlichen Annahmen werden wie in REMIND auf der Ebene von 12 unabhängigen Weltregionen getroffen, mit der EU27+UK als eigenständiger Region, welche im Fokus dieser Studie steht. Daher ist eine direkte Interpretation der Modellierungsergebnisse auf EU-Länderebene nicht möglich, und die Empfehlungen für die Landnutzungspolitik sind für die gesamte EU zu verstehen.

MAGPIE modelliert die Lebensmittelsysteme und den Landnutzungssektor einschließlich aller relevanten Markttreiber und biophysikalischen Eigenschaften des Landes. Einige Optionen und Faktoren sind jedoch nicht im Modell enthalten und können daher in dieser Studie nicht analysiert werden. Dazu gehören zum Beispiel der ökologische Landbau und verschiedene Feedback-Effekte der Landbewirtschaftung wie die Bodendegradation. Das Modell umfasst die wichtigsten Optionen zur Minderung der THG-Emissionen im Landnutzungssektor (u.a. Aufforstung, Stopp der Entwaldung, Bioenergieerzeugung und weniger umweltschädliche landwirtschaftliche Produktionsverfahren), ist aber in dieser Hinsicht nicht umfassend. Vor allem die Bewirtschaftung von Moorflächen und Bodenkohlenstoff wird in den vorgestellten Szenarien nicht modelliert. Hier bestehen daher möglicherweise zusätzliche Emissionsminderungspotentiale, die über diese Studie hinausgehen.

CO₂-Verbrauchsmodell

Das Modell zur Berechnung von Verteilungseffekten stützt sich auf eine Verrechnung privater Konsumausgaben mit Input-Output-Berechnungen, mit dessen Hilfe der CO₂-Fußabdruck des Konsums privater Haushalte ermittelt werden kann (vgl. Grainger & Kolstad (2010) für die USA sowie Gill & Möller (2018) und Preuß et al. (2019) für Deutschland).

Dazu werden zunächst die direkten und indirekten CO₂-Emissionen, die beim Konsum bestimmter Güter und Dienstleistungen anfallen, mit den Konsumausgaben der privaten Haushalte für die entsprechenden Gütergruppen verknüpft. Dies geschieht mithilfe der aktuellen Welle der Umweltökonomischen Gesamtrechnung (UGR) für das Jahr 2015 (Destatis, 2019) und den Konsumausgaben für das Jahr 2015 aus der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung (VGR) (Destatis, 2020b). Die UGR fasst die indirekten CO₂-Emissionen des inländischen Konsums sowie die direkten Emissionen des Konsums, insbesondere im Bereich Gebäudewärme und Verkehr, in einer Input-Output-Rechnung zusammen, während die VGR für die gleichen Gütergruppen die Konsumausgaben der privaten Haushalte erfasst. Die Verknüpfung der beiden Datensätze ergibt für jede Gütergruppe die CO₂-Intensität, das heißt die Emissionen je verausgabten Euro (Vektor g). Im nächsten Schritt wird die CO₂-Intensität mit den Ausgaben, a , der privaten Haushalte für jeden Verwendungszweck kombiniert. Dazu wird die aktuelle Welle der Einkommens- und Verbrauchsstichprobe (EVS) für das Jahr 2018 (Destatis, 2020a) genutzt. Die EVS erfasst detailliert die Ausgaben für verschiedene Verwendungszwecke von circa 40.000 deutschen Haushalten. Aus der Verknüpfung der Konsumausgaben aus der EVS mit der CO₂-Intensität der Ausgaben ergeben sich die Gesamtemissionen der Haushalte, $e = g*a$, für einen durchschnittlichen Warenkorb. Schließlich können die CO₂-Emissionen eines jeden Haushalts mit einem CO₂-Preis, τ , multipliziert werden und ergeben so die Mehrkosten der Haushalte durch einen CO₂-Preis: $\tau*e$.

Eine implizite Annahme dieser Betrachtungsweise ist, dass die Zusatzkosten durch die Einführung (und Erhöhung) eines CO₂-Preises vollständig an Konsumenten weitergegeben werden. Darüber hinaus wird davon ausgegangen, dass ein Grenzausgleich stattfindet, sodass in der Analyse der CO₂-Preis nicht nur auf die inländische Produktion, sondern auch auf alle Importe angewendet wird.

Um in der Analyse auch Verhaltensänderungen als Reaktion auf CO₂-Preis-induzierte Preisänderungen sowie auf Einkommensänderungen durch eine Rückverteilung zu berücksichtigen, werden die von Pothén & Tovar Reaños (2018) auf Basis der EVS-Wellen von 1993 bis 2013 ermittelten Preis- und Ausgabenelastizitäten zugrunde gelegt.

Ökonometrische Modellierung

Kaltstarts

Die für das Modell der Kaltstarts verwendeten Daten stammen aus dem Deutschen Mobilitätspanel für die Jahre 2000–2018. Unter Ausnutzung der Längsschnittstruktur der Daten verwenden wir Panel-Schätzverfahren mit Fixed Effects, um die Auswirkungen des Kraftstoffpreises auf die Anzahl der Fahrten anhand der folgenden ökonometrischen Spezifikation zu schätzen:

$$\text{Kaltstarts} = \beta + \beta_p p_{it} + \beta_x^T x_{it} + \theta_i + \tau_t + \varepsilon_{it}$$

Dabei bezeichnet p den von Haushalt i in der Periode t gezahlten Literpreis für Benzin oder Dieseldieselfkraftstoff und β_p misst die Reaktion auf den Kraftstoffpreis. Bei Haushalten, die eine Mischung aus Diesel- und Benzinfahrzeugen besitzen, ordnen wir dieser Variable den Dieselpreis zu, wobei sich die Ergebnisse nur unwesentlich ändern, wenn der Benzinpreis zugeordnet wird. Der Vektor x enthält zeitvariable Kontrollvariablen und der Vektor β_x^T erfasst die zu schätzenden Parameter. Darüber hinaus kontrollieren wir für Haushalts-Fixed Effects θ_i und eine Reihe von Jahres-Fixed Effects τ_t . ε_{it} bezeichnet den idiosynkratischen Fehlerterm, der unbeobachtete Schocks abbildet.

Ob wir der Schätzung des Kraftstoffpreises eine kausale Interpretation zuschreiben können, hängt entscheidend von der bedingten Unabhängigkeitsannahme (CIA) ab, die voraussetzt, dass alle Variablen, die die Kraftstoffpreise beeinflussen und mit der Anzahl der Autotouren in Zusammenhang stehen können, beobachtbar sind. Auch wenn eine Verzerrung durch ausgelassene Variablen nie ganz ausgeschlossen werden kann, so sprechen doch mehrere Merkmale des analytischen Aufbaus für die CIA. Eine davon ist die relativ kurze zeitliche Dimension des Panels von drei Jahren. Hierdurch wird der Spielraum begrenzt, zeitvariable Determinanten auszulassen, die nicht bereits durch die Fixed Effects für Haushalt und Jahr erfasst werden. In Verbindung mit der Kontrolle für zeitvariable sozioökonomische und demografische Merkmale erscheinen Verzerrungen, die andernfalls durch die Korrelation unbeobachteter Haushaltsmerkmale mit den Kraftstoffpreisen entstehen könnten, unwahrscheinlich.

Ladeinfrastruktur und Zulassung von Elektrofahrzeugen

Das ökonometrische Modell der Zulassung von Elektrofahrzeugen verwendet ebenfalls ein Panel und kann daher wie in Gleichung (1) dargestellt werden, wobei die abhängige Variable die Anzahl der Elektroautozulassungen und die wichtigste erklärende Variable die Anzahl der Ladepunkte, jeweils gemessen nach Landkreis und Jahr, erfasst. Die Daten über Zulassungen von Elektroautos stammen vom Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA 2019). Die Bundesnetzagentur (BNetzA 2019) hat eine Liste der registrierten Ladestationen, einschließlich Datum der Inbetriebnahme und geografischer Koordinaten, bereitgestellt, die wir als Datengrundlage für die Ladeinfrastruktur verwendet haben.

Die Schätzungen des Modells sind möglicherweise durch Simultanität verzerrt, die auftreten würde, wenn die Anzahl der Elektroautos gleichzeitig eine Determinante der Ladeinfrastruktur wäre. Wir begegnen dieser potenziellen Quelle von Endogenität, indem wir auf sogenannte Instrumente für Ladepunkte zurückgreifen und das Modell mit Hilfe von 2SLS (Zweistufige Kleinste-Quadrate-Schätzung) schätzen. Die erste Stufe regressiert Ladestationen auf drei Instrumente: die Anzahl der Lebensmittelgeschäfte, die Anzahl der Transformatoren und die Anzahl der Autobahntankstellen, die alle auf Kreisebene gemessen werden. Mithilfe dieses Modells werden die vorhergesagten Werte der Ladepunkte generiert, die dann als erklärende Variable in einem zweiten Modell für die Zulassung von Elektrofahrzeugen verwendet werden. Dieses Verfahren dient dazu, die Schätzung von Endogenitätsverzerrungen zu befreien.

Referenzen

- Baumstark, L. et al. (2021) '**REMIND2.1: Transformation and innovation dynamics of the energy-economic system within climate and sustainability limits**', Geoscientific Model Development Discussions, pp. 1–50. doi:10.5194/gmd-2021-85.
- Luderer, G. et al. (2020) **REMIND** – REgional Model of INvestments and Development. Zenodo. doi:10.5281/zenodo.4091409.
- Destatis. (2020a). **Einkommens- und Verbrauchsstichprobe 2018 Grundfile 3 (AAGSHB)**. Statistisches Bundesamt (Destatis).
- Destatis. (2020b). **VGR des Bundes – Input-Output-Rechnung – 2015 (Revision 2019, Stand: August 2019) (Fachserie 18, Reihe 2)**. Statistisches Bundesamt (Destatis).
- Dietrich, Jan Philipp, Benjamin Leon Bodirsky, Florian Humpenöder, Isabelle Weindl, Miodrag Stevanović, Kristine Karstens, Ulrich Kreidenweis, et al. (2019) **MAGPIE 4 – a Modular Open-Source Framework for Modeling Global Land Systems**. Geoscientific Model Development 12 (4): 1299–1317. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-1299-2019>.
- EC (European Commission) (2014). **Directive 2014/94/eu** of the European Parliament and of the council of 22 October 2014 on the deployment of alternative fuels infrastructure European Commission. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014L0094&from=EN>
- Frondel, M., Marggraf, C., Sommer, S., & Vance, C. (2021) **Reducing Vehicle Cold Start Emissions through Carbon Pricing: Evidence from Germany**. Environmental Research Letters, 16(3) 034041.
- Grainger, C. A., & Kolstad, C. D. (2010). **Who pays a price on carbon?** Environmental and Resource Economics, 46(3), 359–376.
- Gill, B., & Moeller, S. (2018). **GHG Emissions and the rural-urban divide**. A carbon footprint analysis based on the German official income and expenditure survey. Ecological Economics, 145, 160–169.
- OECD. (2009). **What are equivalence scales?** <https://www.oecd.org/economy/growth/OECD-Note-EquivalenceScales.pdf>
- Pothen, F., & Tovar Reaños, M. A. (2018). **The distribution of material footprints in Germany**. Ecological Economics, 153, 237–251.
- Preuß, M., Reuter, W. H., & Schmidt, C. M. (2019). **Verteilungswirkung einer CO₂-Bepreisung in Deutschland** (Arbeitspapier Nr. 08/2019). Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung.
- Sommer, S. and Vance, C. (2021). **Do more chargers mean more electric cars?** Environmental Research Letters. 16(6) 064092.