

**Führt der Handel mit CO2-Zertifikaten
nachweislich zu einer signifikanten
Verlangsamung des menschengemachten
Klimawandels?**

KI-generiertes Akademisches Thesis-Showcase

Akademische Thesis KI (Multi-Agenten-System)

Januar 2025

Table of Contents

| | |
|---|----|
| Abstract | 1 |
| Einleitung | 3 |
| Literaturübersicht | 4 |
| 1.1 Geschichte des Emissionshandels und der Kohlenstoffpreismechanismen . | 5 |
| 1.2 Theoretische Grundlagen der Umweltökonomie | 10 |
| 1.3 CO ₂ -Preismechanismen und Klimaschutz | 15 |
| Vergleich der Kohlenstoffpreismechanismen | 17 |
| 1.4 Empirische Studien zur Wirksamkeit | 22 |
| 1.5 Kritische Perspektiven und Herausforderungen | 26 |
| Methodik | 31 |
| 2.1 Analyserahmen für die Klimaschutzwirkung | 32 |
| Analyserahmen für die Klimaschutzwirkung | 34 |
| 2.2 Auswahlkriterien für Fallstudien | 34 |
| 2.3 Datenquellen und Messverfahren | 36 |
| 2.4 Statistische Methoden zur Wirksamkeitsanalyse | 38 |
| Schritte der Methodik zur Wirksamkeitsanalyse | 41 |
| Emissionsreduktionen durch CO ₂ -Handel | 44 |
| Ablauf des Emissionshandelssystems (Cap-and-Trade) | 47 |
| Preisgestaltung und Marktmechanismen | 47 |
| Fallstudien (EU ETS, Kalifornien, China) | 50 |
| Ausgewählte Kennzahlen der Emissionshandelssysteme | 54 |
| Vergleich mit anderen Klimaschutzinstrumenten | 55 |
| Empirische Belege für Klimaschutzwirkung | 59 |
| Szenarioprojektionen für CO ₂ -Reduktionen | 64 |
| Diskussion | 65 |
| Implikationen für die Klimapolitik | 65 |

| | |
|---|----|
| Grenzen und Herausforderungen des Emissionshandels | 68 |
| Verbesserungsvorschläge für CO ₂ -Märkte | 71 |
| Rolle im globalen Klimaschutz | 73 |
| Empfehlungen für Politik und Wirtschaft | 76 |
| Einschränkungen | 79 |
| Methodische Einschränkungen | 80 |
| Umfang und Generalisierbarkeit | 81 |
| Temporale und kontextuelle Einschränkungen | 82 |
| Theoretische und konzeptionelle Einschränkungen | 83 |
| Zukünftige Forschungsrichtungen | 84 |
| 1. Empirische Validierung und großangelegte Tests | 84 |
| 2. Sektorale Dekarbonisierungspfade und Kohlenstoffpreise | 85 |
| 3. Rolle von Carbon Dioxide Removal (CDR) und naturbasierten Lösungen . | 85 |
| 4. Longitudinal- und Vergleichsstudien | 86 |
| 5. Technologische Integration und Innovation (Blockchain, KI) | 86 |
| 6. Politik- und Implementierungsforschung | 87 |
| 7. Verteilungsgerechtigkeit und “Just Transition” | 87 |
| Fazit | 88 |
| Hauptergebnisse zur Klimaschutzwirkung | 89 |
| Beitrag zum Verständnis des Emissionshandels | 90 |
| Zukünftige Forschungsrichtungen | 92 |
| Anhang A: Detaillierter Analyserahmen und Modellspezifikationen | 94 |
| A.1 Theoretische Fundierung des Analyserahmens | 94 |
| A.2 Detaillierte Modellspezifikationen | 95 |
| A.3 Robustheits- und Sensitivitätsanalysen | 96 |
| Anhang C: Erweiterte Fallstudiendaten und Szenarioprojektionen | 98 |
| C.1 Emissionsentwicklung im EU ETS (2005-2023) | 98 |

| | |
|---|-----|
| C.2 Szenarioprojektionen für Emissionsreduktionen in Kalifornien (bis 2040) | 99 |
| C.3 Vergleich der Kohlenstoffpreise und Volatilität (2018-2023) | 99 |
| C.4 Potenzial von Carbon Dioxide Removal (CDR) im Kohlenstoffmarkt . . | 100 |
| Anhang D: Zusätzliche Referenzen und Ressourcen | 102 |
| D.1 Foundational Texts und wichtige Berichte | 102 |
| D.2 Schlüsselstudien und Forschungspapiere | 103 |
| D.3 Online-Ressourcen und Datenbanken | 104 |
| D.4 Software/Tools für Emissionshandel und Analyse | 104 |
| D.5 Professionelle Organisationen und Think Tanks | 105 |
| Anhang E: Glossar der Begriffe | 106 |
| References | 110 |

Abstract

Forschungsproblem und Ansatz: Die Menschheit steht vor der kritischen Frage, wie der menschengemachte Klimawandel effektiv verlangsamt werden kann. Angesichts der weitreichenden und unbestreitbaren Auswirkungen der globalen Erwärmung, die primär anthropogenen Ursprungs sind, konzentriert sich diese Arbeit auf die Rolle von Kohlenstoffpreis-mechanismen. Das zentrale Problem ist die Bewertung, ob der Handel mit CO2-Zertifikaten nachweislich zu einer signifikanten Verlangsamung des Klimawandels führt.

Methodik und Ergebnisse: Die Studie verfolgt einen multidimensionalen Ansatz, der ökonometrische Analysen von Paneldaten und Difference-in-Differences-Methoden verwendet, um die Klimaschutzwirkung von Emissionshandelssystemen (EHS) wie dem EU ETS und dem kalifornischen Cap-and-Trade-Programm zu bewerten. Die Ergebnisse bestätigen, dass EHS grundsätzlich wirksam sind, um Emissionen zu reduzieren und Investitionen in kohlenstoffarme Technologien anzureizen. Die Wirksamkeit ist jedoch stark von der Systemgestaltung, der Preisstabilität und der Integration in umfassendere Politikpakete abhängig.

Wesentliche Beiträge: (1) Eine umfassende Synthese der empirischen Evidenz zur Wirksamkeit von EHS, (2) die Analyse von Grenzen und Herausforderungen wie Preisvolatilität und Carbon Leakage, sowie (3) die Identifizierung von Verbesserungspotenzialen durch Marktstabilität, Sektorerweiterung und digitale Technologien wie Blockchain.

Implikationen: Die Ergebnisse unterstreichen die Notwendigkeit einer klaren, langfristigen politischen Rahmensetzung, flankierender sozialer Maßnahmen und internationaler Kooperation zur Maximierung des Potenzials von CO2-Märkten. Diese Erkenntnisse sind entscheidend für die Gestaltung zukünftiger Klimaschutzstrategien, um eine effektive und sozial gerechte Dekarbonisierung zu ermöglichen.

Keywords: Klimawandel, CO2-Zertifikate, Emissionshandel, Klimaschutz, Dekarbonisierung, Umweltökonomie, Marktmechanismen, Nachhaltigkeit, Kohlenstoffpreise, Poli-

tikimplikationen, Technologietransfer, Just Transition, Blockchain, Carbon Leakage, Marktstabilität.

Einleitung

Die Menschheit steht vor einer entscheidenden Frage: Wie gehen wir mit dem Klimawandel um? Er entpuppt sich als die größte globale Herausforderung unserer Zeit (Bertram et al., 2014). Die Wissenschaft ist sich weitgehend einig: Die beobachtete Erwärmung und die damit verbundenen Klimaänderungen sind hauptsächlich vom Menschen verursacht. Das liegt an den enormen Treibhausgasemissionen seit der Industrialisierung (Bertram et al., 2014). Die Folgen? Sie sind heute schon deutlich spürbar (Tyagi & Haritash, 2024). Wir erleben nicht nur steigende globale Durchschnittstemperaturen und damit häufigere, intensivere Hitzewellen, sondern auch extreme Wetterereignisse wie Dürren, Überschwemmungen und Stürme. Hinzu kommen ein beschleunigter Meeresspiegelanstieg und der alarmierende Verlust der biologischen Vielfalt. Diese ökologischen Verschiebungen haben weitreichende sozioökonomische Auswirkungen (Harris & McCarthy, 2023). Sie bedrohen die Nahrungsmittelsicherheit, verstärken Migrationsströme, beeinträchtigen die öffentliche Gesundheit und gefährden die wirtschaftliche Stabilität vieler Regionen. Es ist also unerlässlich, jetzt wirksame Maßnahmen zur Reduzierung der THG-Emissionen zu ergreifen. Das erfordert ein koordiniertes Vorgehen – global, national und lokal.

Angesichts dieser existenziellen Bedrohung haben internationale Abkommen – man denke an das Kyoto-Protokoll oder das Pariser Abkommen – versucht, einen Rahmen für gemeinsame Klimaschutzmaßnahmen zu schaffen (Asadnabizadeh & Moe, 2024). Sie setzen auf technologische Innovationen, Verhaltensänderungen und politische Instrumente, um den Übergang zu einer kohlenstoffarmen Wirtschaft zu ermöglichen. Doch trotz all dieser Bemühungen bleibt eine beträchtliche “Klimaschutzlücke”. Das erschwert das Erreichen der Pariser Ziele – die globale Erwärmung auf deutlich unter 2°C über dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen...

Literaturübersicht

Die Dringlichkeit des Klimawandels und die Notwendigkeit einer globalen Dekarbonisierung haben die Entwicklung und Implementierung effektiver Klimaschutzstrategien in den Vordergrund der politischen und wissenschaftlichen Debatte gerückt. Unter den verschiedenen Ansätzen zur Minderung von Treibhausgasemissionen haben sich Kohlenstoffpreismechanismen als zentrale Instrumente etabliert, die darauf abzielen, externe Umweltkosten zu internalisieren und marktwirtschaftliche Anreize für emissionsminderndes Verhalten zu schaffen (Winkler et al., 2010)(Emeka-Okoli et al., 2024). Diese Mechanismen, die von Emissionshandelssystemen (ETS) bis hin zu Kohlenstoffsteuern reichen, repräsentieren einen paradigmatischen Wandel von traditionellen Command-and-Control-Regulierungen hin zu flexibleren, kosteneffizienteren Ansätzen (Conrad & Wang, 1995). Die Literaturübersicht wird die historische Entwicklung, die theoretischen Grundlagen, die empirische Wirksamkeit und die kritischen Herausforderungen dieser Instrumente detailliert beleuchten. Sie wird aufzeigen, wie sich Kohlenstoffpreismechanismen von den ersten internationalen Bemühungen bis zu den komplexen, vielschichtigen Systemen von heute entwickelt haben und welche Rolle sie in der zukünftigen Klimapolitik spielen könnten. Ziel ist es, ein umfassendes Verständnis der aktuellen Forschungslage zu vermitteln und Wissenslücken zu identifizieren, die für weitere Untersuchungen relevant sind.

Die steigende Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre, primär anthropogenen Ursprungs, führt zu einer globalen Erwärmung mit weitreichenden und potenziell katastrophalen Folgen für Ökosysteme, Gesellschaften und die Weltwirtschaft (Digitemie & Ekemezie, 2024). Angesichts dieser Bedrohung haben internationale Abkommen und nationale Politiken versucht, Emissionen zu reduzieren. Ein zentraler Ansatz in dieser Bemühung ist die Bepreisung von Kohlenstoff, die das Ziel verfolgt, den Preis für die Nutzung von fossilen Brennstoffen und andere emissionsintensive Aktivitäten zu erhöhen, um so Anreize für eine Verlagerung hin zu saubereren Technologien und energieeffizienteren Prozessen

zu schaffen (Winkler et al., 2010). Die Idee hinter der Kohlenstoffbepreisung ist, dass die Umweltkosten, die durch Emissionen entstehen, nicht länger als externe Effekte behandelt werden, sondern in die Produktions- und Konsumententscheidungen einfließen (Conrad & Wang, 1995). Dies soll eine effiziente Allokation von Ressourcen fördern und die Reduzierung von Emissionen dort ermöglichen, wo sie am kostengünstigsten ist. Diese theoretische Grundlage bildet den Ausgangspunkt für die Entwicklung verschiedener praktischer Instrumente, deren Wirksamkeit und Herausforderungen in der Literatur intensiv diskutiert werden. Die Komplexität dieser Instrumente liegt nicht nur in ihrem Design, sondern auch in ihrer Wechselwirkung mit nationalen Wirtschaften, sozialen Gerechtigkeitsfragen und globalen Handelsbeziehungen.

1.1 Geschichte des Emissionshandels und der Kohlenstoffpreismechanismen

Die Geschichte der Kohlenstoffpreismechanismen ist eng mit der Entwicklung der internationalen Klimapolitik verbunden und spiegelt die zunehmende Erkenntnis wider, dass globale Umweltprobleme koordinierte, supranationale Lösungen erfordern. Die Anfänge dieses Ansatzes lassen sich bis zum Ende des 20. Jahrhunderts zurückverfolgen, als die internationale Gemeinschaft begann, konkrete Schritte zur Bekämpfung des Klimawandels zu erörtern (Asadnabizadeh & Moe, 2024).

1.1.1 Die Anfänge: Das Kyoto-Protokoll und seine Mechanismen Ein Meilenstein in der internationalen Klimapolitik war das 1997 verabschiedete Kyoto-Protokoll, das erstmals verbindliche Reduktionsziele für Treibhausgasemissionen für Industrieländer festlegte (Asadnabizadeh & Moe, 2024). Über die reinen Reduktionsverpflichtungen hinaus führte das Protokoll flexible Mechanismen ein, die es den teilnehmenden Ländern ermöglichen sollten, ihre Ziele kosteneffizient zu erreichen (Winkler et al., 2010). Diese Mechanismen waren der Emissionshandel (ET), der Mechanismus für umweltverträgliche Entwicklung (Clean Development Mechanism, CDM) und die gemeinsame Umsetzung (Joint Implementation, JI).

Der Emissionshandel nach Kyoto erlaubte es Ländern mit Emissionsverpflichtungen, die ihre Ziele übertrafen, Emissionszertifikate an Länder zu verkaufen, die Schwierigkeiten hatten, ihre Ziele zu erreichen (Asadnabizadeh & Moe, 2024). Dies schuf einen internationalen Markt für Emissionsrechte, der darauf abzielte, die Reduktionen dort zu fördern, wo sie am günstigsten waren, und somit die Gesamtkosten des Klimaschutzes zu senken (Winkler et al., 2010). Die Idee basierte auf dem Konzept, dass eine Tonne CO₂-Reduktion unabhängig vom Ort ihrer Einsparung den gleichen Klimanutzen hat. Die praktische Umsetzung des internationalen Emissionshandels unter dem Kyoto-Protokoll war jedoch mit erheblichen Herausforderungen verbunden, insbesondere hinsichtlich der Festlegung von Emissionsmengen und der Überwachung der Einhaltung. Die Erfahrungen aus dieser Frühphase lieferten wertvolle Erkenntnisse für die Gestaltung nachfolgender Systeme.

Der CDM ermöglichte es Industrieländern, Emissionsminderungen in Entwicklungsländern durchzuführen und die daraus resultierenden zertifizierten Emissionsreduktionen (CERs) auf ihre eigenen Reduktionsziele anzurechnen (Asadnabizadeh & Moe, 2024). Dies sollte nicht nur den Klimaschutz fördern, sondern auch nachhaltige Entwicklung in den Empfängerländern unterstützen. Projekte reichten von der Installation erneuerbarer Energien bis zur Verbesserung der Energieeffizienz. Trotz seines innovativen Ansatzes wurde der CDM oft für seine Komplexität, die Schwierigkeit der Nachweisbarkeit der Zusätzlichkeit von Projekten und seine Anfälligkeit für “Greenwashing” kritisiert (Cerdonio, 2019). Nichtsdestotrotz spielte er eine wichtige Rolle bei der Mobilisierung von Investitionen in Klimaschutzprojekte in Entwicklungsländern und legte den Grundstein für spätere Kompensationsmechanismen.

Die JI ähnelte dem CDM, konzentrierte sich jedoch auf Projekte zwischen Industrieländern mit Emissionsverpflichtungen (Asadnabizadeh & Moe, 2024). Sie erlaubte es einem Land, Emissionsminderungen in einem anderen Industrieland zu finanzieren und die erzielten Emissionsreduktionseinheiten (ERUs) für seine eigenen Ziele zu verwenden. Auch hier stand die Kosteneffizienz im Vordergrund, indem Reduktionen dort stattfanden, wo

sie am wirtschaftlichsten waren. Die Mechanismen des Kyoto-Protokolls stellten einen ersten, wenngleich unvollkommenen, Versuch dar, marktbaserte Instrumente auf globaler Ebene zur Bekämpfung des Klimawandels einzusetzen. Ihre Erfahrungen waren entscheidend für die Weiterentwicklung von Kohlenstoffpreismechanismen und die Gestaltung zukünftiger Klimaschutzabkommen. Die Erkenntnisse aus dem Kyoto-Protokoll zeigten sowohl das Potenzial als auch die Fallstricke internationaler Emissionshandelssysteme auf, insbesondere in Bezug auf Governance, Compliance und die Sicherstellung der Umweltintegrität (Asadnabizadeh & Moe, 2024)(Winkler et al., 2010).

1.1.2 Das Europäische Emissionshandelssystem (EU ETS) als Pionier Aufbauend auf den Erfahrungen des Kyoto-Protokolls und als Reaktion auf die Notwendigkeit, konkrete Maßnahmen auf regionaler Ebene zu ergreifen, wurde 2005 das Europäische Emissionshandelssystem (EU ETS) ins Leben gerufen (Bazelmans, 2008)(Klimko & Hasprová, 2025). Es ist das weltweit größte und älteste multilaterale Emissionshandelssystem und gilt als Eckpfeiler der Klimapolitik der Europäischen Union (Winkler et al., 2010). Das EU ETS deckt Emissionen aus energieintensiven Industrien, Kraftwerken und dem Luftverkehr innerhalb der EU ab und hat das Ziel, die Treibhausgasemissionen kosteneffizient zu reduzieren. Sein Design ist ein Cap-and-Trade-System, bei dem eine Obergrenze (Cap) für die gesamten Emissionen der beteiligten Anlagen festgelegt wird, die mit der Zeit sinkt. Innerhalb dieser Obergrenze werden Emissionszertifikate (EUAs) entweder versteigert oder kostenlos zugeteilt, die von den Unternehmen erworben und für ihre Emissionen abgegeben werden müssen (Bazelmans, 2008).

Die Geschichte des EU ETS lässt sich in mehrere Phasen unterteilen, die jeweils durch Anpassungen und Reformen gekennzeichnet waren, um auf neue Herausforderungen zu reagieren und die Wirksamkeit des Systems zu verbessern (Klimko & Hasprová, 2025). Die **erste Phase (2005-2007)** diente hauptsächlich als Pilotphase und war durch eine großzügige Zuteilung von Emissionszertifikaten gekennzeichnet, was zu einem Überangebot

und einem Zusammenbruch des Kohlenstoffpreises führte (Perino & Willner, 2016). Dies zeigte die Notwendigkeit einer strengeren Obergrenze und einer besseren Abstimmung von Angebot und Nachfrage. Die **zweite Phase (2008-2012)** fiel mit der ersten Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls zusammen und sah eine stärkere Harmonisierung der Zuteilungsregeln, obwohl die kostenlose Zuteilung weiterhin dominierte. Auch in dieser Phase blieben Preisvolatilität und ein Überschuss an Zertifikaten ein Problem, verschärft durch die globale Finanzkrise, die zu einem Rückgang der industriellen Produktion und damit der Emissionen führte (Perino & Willner, 2016).

Die **dritte Phase (2013-2020)** brachte wesentliche Reformen mit sich, darunter eine EU-weite Obergrenze, eine stärkere Verlagerung hin zur Versteigerung von Zertifikaten und die Einbeziehung weiterer Sektoren wie der Luftfahrt (Perino & Willner, 2016). Trotz dieser Reformen blieb der Preis für Emissionszertifikate aufgrund des anhaltenden Überschusses niedrig, was die Anreizwirkung für Investitionen in emissionsarme Technologien schwächte. Als Reaktion darauf wurde 2018 die **Marktstabilitätsreserve (MSR)** eingeführt, ein Mechanismus, der darauf abzielt, den Überschuss an Zertifikaten im Markt zu reduzieren und so die Preisstabilität und die Wirksamkeit des Systems zu verbessern (Perino & Willner, 2016). Die MSR passt die Menge der zur Versteigerung stehenden Zertifikate automatisch an das Marktangebot an.

Die **vierte Phase (2021-2030)** des EU ETS ist Teil des ehrgeizigen “Fit for 55”-Pakets der EU, das eine Reduzierung der Netto-Treibhausgasemissionen um mindestens 55% bis 2030 gegenüber 1990 vorsieht. Diese Phase beinhaltet eine weitere Verschärfung der Obergrenze, eine Ausweitung des Systems auf den Seeverkehr und die Einführung eines separaten Emissionshandelssystems für Gebäude und Straßenverkehr (Kramer, 2022). Die kontinuierliche Weiterentwicklung und Anpassung des EU ETS unterstreicht seine zentrale Rolle in der europäischen Klimapolitik und dient als Modell für andere Regionen weltweit, die ähnliche Mechanismen implementieren wollen (Bazelmans, 2008)(Klimko & Hasprová, 2025). Die Erfahrungen des EU ETS zeigen, dass der Erfolg eines Emissionshandelssystems maßge-

blich von einem ambitionierten und glaubwürdigen Cap, flexiblen Anpassungsmechanismen und der Fähigkeit abhängt, auf wirtschaftliche Schocks und politische Veränderungen zu reagieren.

1.1.3 Globale Verbreitung und Diversifizierung Nach den Pionierleistungen des Kyoto-Protokolls und des EU ETS haben zahlreiche Länder und Regionen weltweit eigene Kohlenstoffpreismechanismen eingeführt oder planen deren Einführung. Diese Diversifizierung spiegelt die wachsende Erkenntnis wider, dass eine globale Dekarbonisierung nur durch eine Vielzahl von nationalen und regionalen Ansätzen erreicht werden kann, die auf die spezifischen wirtschaftlichen, politischen und sozialen Kontexte zugeschnitten sind (Asadnabizadeh & Moe, 2024)(Emeka-Okoli et al., 2024).

Ein prominentes Beispiel ist das **chinesische nationale Emissionshandelssystem**, das 2021 offiziell in Betrieb genommen wurde und damit zum weltweit größten Kohlenstoffmarkt in Bezug auf die abgedeckten Emissionen wurde (Zhang et al., 2024)(Luo & Lim, 2024). Chinas ETS begann zunächst mit der Abdeckung des Energiesektors, mit Plänen zur schrittweisen Ausweitung auf andere energieintensive Industrien. Die Erfahrungen aus der Pilotphase in verschiedenen chinesischen Städten und Provinzen, die bereits vor dem nationalen System bestanden, lieferten wertvolle Erkenntnisse über die Gestaltung und Implementierung eines so umfassenden Systems. Studien zur Wirksamkeit des chinesischen ETS zeigen erste positive Effekte auf die Emissionsreduktion und die Förderung von Innovationen in kohlenstoffarmen Technologien, obwohl Herausforderungen in Bezug auf die Datenqualität, die Durchsetzung und die Allokationsmechanismen bestehen bleiben (Zhang et al., 2024)(Luo & Lim, 2024).

Auch in Nordamerika gibt es mehrere aktive Emissionshandelssysteme. Der **California Cap-and-Trade Program** ist seit 2013 in Kraft und deckt einen Großteil der Emissionen des Bundesstaates ab, einschließlich Stromerzeugung, Industrie und Transport. Das System ist bekannt für seine ambitionierten Ziele und seine Verknüpfung mit dem Que-

bec Cap-and-Trade Program, was einen größeren und stabileren Markt schafft (Prete et al., 2023). In Kanada haben mehrere Provinzen eigene Kohlenstoffpreismechanismen eingeführt, darunter sowohl Kohlenstoffsteuern als auch Cap-and-Trade-Systeme, die auf die nationalen Klimaziele abgestimmt sind (Bello, 2024). Diese regionalen Ansätze zeigen die Flexibilität und Anpassungsfähigkeit von Kohlenstoffpreismechanismen an föderale Strukturen und unterschiedliche wirtschaftliche Bedingungen.

Andere bemerkenswerte Entwicklungen umfassen die Einführung von Kohlenstoffsteuern in Ländern wie Schweden, Finnland und der Schweiz, die seit Langem erfolgreich zur Emissionsreduktion beitragen, sowie die Entwicklung von Emissionshandelssystemen in Südkorea, Neuseeland und Mexiko (Emeka-Okoli et al., 2024)(Thamrin et al., 2025). Jedes dieser Systeme weist spezifische Merkmale auf, die auf die nationalen Gegebenheiten zugeschnitten sind, sei es die Abdeckung bestimmter Sektoren, die Höhe des Kohlenstoffpreises oder die Verwendung der Einnahmen. So hat beispielsweise Indonesien eine Kohlenstoffsteuerpolitik zur Erreichung seiner nationalen Klimaziele eingeführt, die die Bedeutung dieses Instruments in Schwellenländern unterstreicht (Thamrin et al., 2025).

Die zunehmende Verbreitung von Kohlenstoffpreismechanismen weltweit deutet auf eine Konvergenz in der Klimapolitik hin, bei der marktbasierter Instrumente als effiziente Mittel zur Emissionsreduktion anerkannt werden. Gleichzeitig zeigt die Vielfalt der Ansätze, dass es keinen “One-size-fits-all”-Lösung gibt, und dass die Gestaltung dieser Mechanismen sorgfältig an die nationalen Kontexte angepasst werden muss, um ihre Wirksamkeit und Akzeptanz zu maximieren (Emeka-Okoli et al., 2024). Die Erfahrungen aus diesen verschiedenen Systemen tragen wesentlich zum Verständnis der besten Praktiken und der Herausforderungen bei der Implementierung von Kohlenstoffpreisen bei.

1.2 Theoretische Grundlagen der Umweltökonomie

Die theoretischen Grundlagen der Umweltökonomie bilden das Fundament für das Verständnis, warum Kohlenstoffpreismechanismen als effektive Instrumente zur Bekämpfung

des Klimawandels angesehen werden. Diese Theorien erklären, wie Marktversagen im Kontext von Umweltgütern entsteht und wie politische Instrumente, insbesondere marktbasierter, diese Versagen korrigieren können, um eine effizientere Allokation von Ressourcen und eine nachhaltigere Nutzung der Umwelt zu fördern (Conrad & Wang, 1995)(Winkler et al., 2010).

1.2.1 Externalitäten und Marktversagen Das zentrale Konzept der Umweltökonomie, das die Notwendigkeit von Klimaschutzmaßnahmen erklärt, ist das der **Externalitäten**. Externalitäten treten auf, wenn die Produktion oder der Konsum eines Gutes direkte Auswirkungen auf Dritte hat, die nicht am Marktgeschehen beteiligt sind und für die diese Auswirkungen weder bezahlt noch entschädigt werden (Winkler et al., 2010). Im Falle des Klimawandels sind die Emissionen von Treibhausgasen, die bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe oder industriellen Prozessen entstehen, eine klassische negative Externalität. Die Verursacher der Emissionen tragen nicht die vollen Kosten der Umweltzerstörung – wie Klimawandel, steigender Meeresspiegel, extreme Wetterereignisse oder Gesundheitssauswirkungen –, sondern diese Kosten werden der Gesellschaft als Ganzes aufgebürdet.

Da die externen Kosten nicht im Marktpreis des emittierenden Gutes (z.B. Strom aus Kohlekraftwerken) enthalten sind, produziert der Markt zu viel von diesem Gut und verursacht zu viele Emissionen. Dies führt zu einem **Marktversagen**, da die freie Marktwirtschaft ohne Intervention nicht in der Lage ist, eine sozial optimale Menge an Gütern und Dienstleistungen zu produzieren, die sowohl private als auch soziale Kosten und Nutzen berücksichtigt (Conrad & Wang, 1995). Die Folge ist eine ineffiziente Ressourcenallokation und eine Übernutzung der Umwelt als “Senke” für Emissionen. Die Umweltökonomie argumentiert, dass staatliche Interventionen notwendig sind, um diese externen Kosten zu internalisieren und die Marktpreise so zu gestalten, dass sie die wahren gesellschaftlichen Kosten widerspiegeln. Kohlenstoffpreismechanismen sind genau darauf ausgelegt, diese Externalität zu korrigieren, indem sie den Emissionen einen Preis zuweisen und somit die Umweltkosten für die Verursacher sichtbar und monetär fassbar machen (Winkler et al., 2010).

1.2.2 Pigou-Steuern und das Coase-Theorem Historisch gesehen wurden zwei Hauptansätze zur Lösung von Externalitäten vorgeschlagen: die Pigou-Steuer und das Coase-Theorem. Der britische Ökonom Arthur Pigou schlug bereits Anfang des 20. Jahrhunderts vor, dass negative Externalitäten durch eine Steuer auf die externitätserzeugende Aktivität korrigiert werden sollten (Conrad & Wang, 1995). Eine **Pigou-Steuer**, im Kontext des Klimawandels eine **Kohlenstoffsteuer**, wird auf jede Einheit der emittierten Treibhausgase erhoben. Die Höhe der Steuer sollte idealerweise den Grenzkosten des externen Schadens entsprechen, um die Emittenten dazu zu bewegen, ihre Emissionen auf das sozial optimale Niveau zu reduzieren. Der Vorteil einer Kohlenstoffsteuer liegt in ihrer Preissicherheit: Unternehmen wissen genau, welche Kosten pro Tonne Emissionen anfallen, was die Planung von Investitionen in emissionsmindernde Technologien erleichtert (Xiong, 2024). Darüber hinaus generieren Kohlenstoffsteuern Einnahmen für den Staat, die für andere Zwecke, wie die Förderung erneuerbarer Energien, die Reduzierung anderer Steuern oder die Unterstützung eines gerechten Übergangs, verwendet werden können (Chapatuka, 2025).

Ronald Coase hingegen argumentierte in den 1960er Jahren, dass Externalitäten auch ohne staatliche Intervention durch Verhandlungen zwischen den betroffenen Parteien gelöst werden könnten, sofern Eigentumsrechte klar definiert sind und die Transaktionskosten gering sind. Das **Coase-Theorem** besagt, dass, unabhängig davon, welcher Partei die Eigentumsrechte (z.B. an sauberer Luft) zugewiesen werden, ein effizientes Ergebnis durch private Verhandlungen erzielt wird (Ventura et al., 2016). Im Kontext des Klimawandels ist die Anwendung des Coase-Theorems jedoch schwierig. Die Vielzahl der Emittenten und Betroffenen, die globalen Auswirkungen von Emissionen und die hohen Transaktionskosten, die mit Verhandlungen zwischen Milliarden von Individuen und Unternehmen verbunden wären, machen eine private Lösung praktisch unmöglich. Daher wird für die Klimapolitik in der Regel auf staatliche oder supranationale Interventionen in Form von Pigou-Steuern oder Emissionshandelssystemen zurückgegriffen.

1.2.3 Marktbasierte Instrumente vs. Command-and-Control Die Umweltökonomie unterscheidet grundsätzlich zwischen zwei Kategorien von Politikinstrumenten zur Regulierung von Umweltverschmutzung: **Command-and-Control-Ansätze** und **Marktbasierten Instrumenten** (Kreis-Hoyer, 2000)(Ekardt & Hennig, 2011).

Command-and-Control-Ansätze sind traditionelle Regulierungen, die spezifische Verhaltensweisen vorschreiben oder verbieten. Beispiele hierfür sind Emissionsgrenzwerte für bestimmte Anlagen, die Vorschrift bestimmter Technologien (z.B. Filteranlagen) oder Verbote von umweltschädlichen Substanzen. Der Hauptvorteil dieser Ansätze ist ihre Direktheit und die Möglichkeit, schnell auf Umweltprobleme zu reagieren. Ihre Nachteile liegen jedoch in ihrer Inflexibilität und Ineffizienz. Sie bieten wenig Anreize für Unternehmen, über die vorgeschriebenen Mindeststandards hinauszugehen, und berücksichtigen nicht die unterschiedlichen Kostenstrukturen von Unternehmen zur Emissionsreduktion. Ein Unternehmen, für das die Reduktion einer Tonne CO₂ sehr teuer ist, muss die gleiche Maßnahme ergreifen wie ein Unternehmen, für das dies sehr günstig ist, was zu höheren Gesamtkosten für die Gesellschaft führt (Kreis-Hoyer, 2000)(Ekardt & Hennig, 2011).

Marktbasierte Instrumente hingegen nutzen die Kräfte des Marktes, um Anreize für umweltfreundliches Verhalten zu schaffen. Sie legen entweder einen Preis für Emissionen fest (wie bei einer Kohlenstoffsteuer) oder begrenzen die Gesamtmenge der Emissionen und lassen den Preis durch Angebot und Nachfrage entstehen (wie bei einem Emissionshandelssystem). Der Hauptvorteil dieser Instrumente ist ihre **Kosteneffizienz**. Da sie den Unternehmen die Freiheit lassen, wie sie ihre Emissionen reduzieren, werden die Reduktionen dort vorgenommen, wo sie am günstigsten sind. Dies führt zu den geringsten Gesamtkosten für die Gesellschaft, um ein bestimmtes Umweltziel zu erreichen. Darüber hinaus bieten marktbasierte Instrumente kontinuierliche Anreize für Innovationen in umweltfreundlichen Technologien, da jede weitere Emissionsreduktion unterhalb des gesetzlich vorgeschriebenen Niveaus finanzielle Vorteile mit sich bringt (Kreis-Hoyer, 2000)(Conrad & Wang, 1995). Die Literatur betont die Überlegenheit marktbasierter Instrumente hinsichtlich ihrer Effizienz

und Flexibilität im Vergleich zu starren Command-and-Control-Regulierungen (Ekardt & Hennig, 2011).

1.2.4 Ökonomische Effizienz und Kosteneffektivität Das Konzept der **ökonomischen Effizienz** ist zentral für die Argumentation zugunsten von Kohlenstoffpreismechanismen. Ein System ist ökonomisch effizient, wenn es ein gegebenes Ziel (z.B. eine bestimmte Emissionsreduktion) mit den geringstmöglichen Kosten für die Gesellschaft erreicht (Conrad & Wang, 1995). Marktbasierte Instrumente wie Kohlenstoffsteuern und Emissionshandelssysteme sind darauf ausgelegt, dieses Effizienzziel zu erreichen.

Bei einem Emissionshandelssystem sorgt der Marktmechanismus dafür, dass der Preis für ein Emissionszertifikat (der Grenzkosten der Emissionsreduktion entspricht) für alle teilnehmenden Unternehmen gleich ist. Unternehmen, deren Grenzkosten der Reduktion unter dem Marktpreis liegen, werden ihre Emissionen reduzieren, um Zertifikate zu verkaufen. Unternehmen, deren Grenzkosten über dem Marktpreis liegen, werden Zertifikate kaufen. Dies führt zu einer Allokation der Reduktionslast, bei der die Gesamtkosten minimiert werden (Kreis-Hoyer, 2000).

Ähnlich verhält es sich bei einer Kohlenstoffsteuer: Jedes Unternehmen wird seine Emissionen reduzieren, solange die Grenzkosten der Reduktion unter der Höhe der Steuer liegen. Sobald die Grenzkosten die Steuerhöhe erreichen, wird es günstiger, die Steuer zu zahlen, als weitere Reduktionen vorzunehmen. Auch hier führt dies zu einer kosteneffizienten Verteilung der Reduktionsbemühungen über alle Emittenten hinweg (Conrad & Wang, 1995).

Die **Kosteneffektivität** ist ein entscheidendes Argument für die Implementierung von Kohlenstoffpreisen, insbesondere im Kontext globaler Klimaziele, die massive Investitionen und strukturelle Veränderungen erfordern. Die Fähigkeit, Emissionen dort zu reduzieren, wo es am günstigsten ist, ermöglicht es, ehrgeizige Klimaziele zu erreichen, ohne die Wirtschaft übermäßig zu belasten. Dies ist besonders relevant in Ländern mit unterschiedlichen technologischen Reifegraden und wirtschaftlichen Strukturen (Winkler et al.,

2010). Die Literatur zeigt, dass die Kosteneffektivität von Kohlenstoffpreisen ein wichtiger Faktor für ihre breite Akzeptanz und Implementierung in verschiedenen Jurisdiktionen ist, auch wenn die tatsächliche Umsetzung oft durch politische und soziale Faktoren kompliziert wird.

1.3 CO₂-Preismechanismen und Klimaschutz

Die Anwendung der theoretischen Konzepte der Umweltökonomie hat zur Entwicklung einer Reihe von praktischen Kohlenstoffpreismechanismen geführt, die darauf abzielen, die Verursacher von Treibhausgasemissionen direkt für die von ihnen verursachten Umweltschäden zur Kasse zu bitten. Diese Mechanismen sind das Herzstück vieler nationaler und internationaler Klimaschutzstrategien (Emeka-Okoli et al., 2024).

1.3.1 Kohlenstoffsteuern Die **Kohlenstoffsteuer** ist ein direkter Preis auf Emissionen, der in der Regel pro Tonne CO₂-Äquivalent erhoben wird (Xiong, 2024). Sie ist ein klassisches Pigou-Instrument, das darauf abzielt, die externen Kosten der Kohlenstoffemissionen zu internalisieren. Der Vorteil einer Kohlenstoffsteuer liegt in ihrer Einfachheit und der Preis-sicherheit, die sie den Unternehmen bietet (Conrad & Wang, 1995). Unternehmen wissen genau, welche Kosten pro Emissionseinheit anfallen, was langfristige Investitionsentscheidungen in kohlenstoffarme Technologien erleichtert.

Die Höhe der Steuer kann von der Regierung festgelegt und angepasst werden, um die gewünschten Emissionsreduktionsziele zu erreichen. Ein höherer Steuerpreis führt zu stärkeren Anreizen zur Reduktion. Einer der Hauptvorteile von Kohlenstoffsteuern ist die Generierung von **Steuereinnahmen**, die für verschiedene Zwecke verwendet werden können: zur Finanzierung von Klimaschutzprojekten, zur Entlastung von Haushalten oder Unternehmen durch Steuersenkungen an anderer Stelle (sogenanntes “Recycling” der Einnahmen) oder zur Unterstützung eines gerechten Übergangs (Chapatuka, 2025). Dies kann die Akzep-

tanz der Steuer erhöhen und potenzielle negative Verteilungswirkungen abmildern (Harris & McCarthy, 2023).

Kritiker von Kohlenstoffsteuern verweisen oft auf die politische Schwierigkeit ihrer Einführung und Erhöhung, da sie direkte Kosten für Verbraucher und Unternehmen bedeuten und daher oft auf Widerstand stoßen (Sommer, 2015). Zudem bieten sie keine Garantie für eine bestimmte Emissionsreduktion, da die Reaktion der Emittenten auf den Preis von deren Preiselastizität abhängt (Xiong, 2024). Länder wie Schweden, Finnland, Kanada und die Schweiz haben erfolgreich Kohlenstoffsteuern implementiert, die zu signifikanten Emissionsreduktionen beigetragen haben (Bello, 2024)(Thamrin et al., 2025). Die Erfahrungen aus diesen Ländern zeigen, dass eine sorgfältige Gestaltung der Steuer, einschließlich der Verwendung der Einnahmen und der Berücksichtigung von Wettbewerbsfragen, entscheidend für ihren Erfolg ist. Indonesien beispielsweise plant eine Kohlenstoffsteuerpolitik, um seine nationalen Klimaziele zu erreichen, was die wachsende Bedeutung dieses Instruments in Schwellenländern unterstreicht (Thamrin et al., 2025).

1.3.2 Emissionshandelssysteme (ETS) Emissionshandelssysteme (ETS), auch bekannt als Cap-and-Trade-Systeme, funktionieren nach dem Prinzip, eine Obergrenze (Cap) für die Gesamtemissionen in einem bestimmten Sektor oder einer Region festzulegen und dann Emissionszertifikate zu verteilen oder zu versteigern, die dieser Obergrenze entsprechen (Kreis-Hoyer, 2000). Jedes Zertifikat erlaubt die Emission einer Tonne CO₂-Äquivalent. Unternehmen müssen für jede emittierte Tonne ein Zertifikat abgeben. Der Handel mit diesen Zertifikaten schafft einen Marktpreis für Emissionen (Winkler et al., 2010).

Der Hauptvorteil eines ETS ist die **Sicherheit der Emissionsreduktion**: Wenn das Cap streng genug ist und mit der Zeit sinkt, ist garantiert, dass die Emissionen das vorgegebene Ziel nicht überschreiten. Die Kosteneffizienz entsteht dadurch, dass Unternehmen, die ihre Emissionen günstig reduzieren können, dies tun und überschüssige

Zertifikate verkaufen, während Unternehmen mit hohen Reduktionskosten Zertifikate von anderen kaufen (Kreis-Hoyer, 2000). Dies führt zu einer Allokation der Reduktionslast, die die Gesamtkosten minimiert (Ekardt & Hennig, 2011).

Die Zuteilung von Emissionszertifikaten ist ein kritischer Aspekt des ETS-Designs. Historisch gesehen erfolgte die Zuteilung oft kostenlos (“Grandfathering”), um die Akzeptanz bei den Unternehmen zu erhöhen und Wettbewerbsnachteile zu vermeiden. Dies kann jedoch zu Mitnahmeeffekten und einem Überangebot an Zertifikaten führen, wie in den frühen Phasen des EU ETS beobachtet (Perino & Willner, 2016). Eine zunehmende Tendenz ist die **Versteigerung** von Zertifikaten, die nicht nur Einnahmen generiert (ähnlich einer Kohlenstoffsteuer), sondern auch Transparenz und Effizienz fördert (Winkler et al., 2010).

Herausforderungen von ETS umfassen die **Preisvolatilität**, die Investitionsentscheidungen erschweren kann (Yu et al., 2022)(Liang et al., 2024). Mechanismus wie die Marktstabilitätsreserve im EU ETS (Perino & Willner, 2016) wurden entwickelt, um extreme Preisschwankungen zu glätten. Auch die Gefahr des **Carbon Leakage**, bei dem Unternehmen ihre Produktion in Länder mit weniger strengen Klimaschutzauflagen verlagern, stellt eine Herausforderung dar. Dies wird oft durch kostenlose Zuteilung für bestimmte Sektoren oder durch Mechanismen wie den CO₂-Grenzausgleich (CBAM) angegangen. Trotz dieser Herausforderungen gelten ETS als eines der robustesten und flexibelsten Instrumente zur Emissionsreduktion, wie die Erfahrungen des EU ETS und des chinesischen ETS zeigen (Klimko & Hasprová, 2025)(Zhang et al., 2024).

Vergleich der Kohlenstoffpreismechanismen

Um die unterschiedlichen Charakteristika von Kohlenstoffsteuern und Emissionshandelssystemen besser zu verstehen, bietet die folgende Tabelle eine vergleichende Übersicht über ihre wesentlichen Merkmale, Vorteile und Nachteile.

Tabelle 1: Vergleich der Kohlenstoffpreismechanismen

| Merkmal | Kohlenstoffsteuer (CS) | Emissionshandelssystem (ETS) | Implikation / Bedeutung |
|----------------------------|--|---|--|
| Preissteuerbindung | Preis pro Tonne CO2 festgelegt. | Preis entsteht durch Angebot & Nachfrage von Zertifikaten. | CS bietet Preissicherheit, ETS garantiert Emissionsmenge. |
| Mengensteuerbindung | Emissionsreduktion ungewiss, hängt von Elastizität ab. | Emissionsmenge (Cap) ist festgelegt & garantiert. | ETS ist effektiver bei der Erreichung spezifischer Reduktionsziele. |
| Einnahmebindung | Generiert direkte Steuereinnahmen für den Staat. | Einnahmen durch Versteigerung von Zertifikaten (oder gratis Zuteilung). | CS bietet stabile Einnahmequelle, ETS kann Einnahmen generieren oder Verteilungswirkung haben. |
| Preissicherheit | für Unternehmen (fester Preis). | Variabel, kann volatil sein. | CS erleichtert Investitionsplanung; ETS erfordert Stabilitätsmechanismen (z.B. MSR). |
| Marktkomplexität | einfach zu implementieren. | Komplexer Markt für Zertifikate muss geschaffen werden. | CS ist administrativ einfacher; ETS erfordert robuste Governance & Überwachung. |
| Innovationsanreiz | kontinuierlicher Anreiz zur Emissionsreduktion. | Kontinuierlicher Anreiz zur Emissionsreduktion | Beide fördern Innovation; ETS kann durch Marktliquidität zusätzliche Anreize bieten. |
| Anpassungsfähigkeit | Flexibel durch Anpassung des Steuersatzes. | Flexibel durch Anpassung des Caps & Marktmechanismen. | Beide anpassbar; ETS reagiert dynamischer auf Marktbedingungen. |

| | Kohlenstoffsteuer | Emissionshandelssystem | |
|---------------|-------------------|------------------------|-------------------------------------|
| Merkmal | (CS) | (ETS) | Implikation / Bedeutung |
| Carbon | Risiko bei | Risiko bei | Beide erfordern Schutzmaßnahmen für |
| Leak- | unilateraler | unilateraler | Wettbewerbsfähigkeit & |
| age | Einführung. | Einführung, Schutz | Emissionsverlagerung. |
| | | durch CBAM. | |

Anmerkung: Die Wahl zwischen CS und ETS hängt von nationalen Zielen, wirtschaftlichen Gegebenheiten und politischer Akzeptanz ab. Oftmals werden Hybridansätze oder Policy-Mixe verwendet.

1.3.3 Kohlenstoffkompensationen (Carbon Offsets) und freiwillige Märkte

Neben Steuern und Handelssystemen spielen **Kohlenstoffkompensationen (Carbon Offsets)** eine wichtige Rolle in der globalen Klimaschutzlandschaft, insbesondere in den freiwilligen Kohlenstoffmärkten (Skopek, 2010). Ein Carbon Offset repräsentiert eine Emissionsreduktion oder -entfernung, die außerhalb des eigenen Betriebs oder der eigenen Wertschöpfungskette eines Unternehmens stattfindet. Unternehmen oder Einzelpersonen können Offsets kaufen, um ihre eigenen verbleibenden Emissionen auszugleichen und Klimaneutralität zu beanspruchen.

Offsets entstehen durch Projekte, die Emissionen reduzieren (z.B. Energieeffizienzprojekte, Umstellung auf erneuerbare Energien) oder atmosphärischen Kohlenstoff entfernen (z.B. Aufforstung, direkte Luftabscheidung). Der **Mechanismus für umweltverträgliche Entwicklung (CDM)** des Kyoto-Protokolls war ein früher, groß angelegter Mechanismus zur Generierung von Offsets (Asadnabizadeh & Moe, 2024). Heute existieren zahlreiche private Standards und Register, die die Entwicklung und Verifizierung von Offset-Projekten überwachen.

Die Vorteile von Offsets liegen in ihrer Fähigkeit, Finanzmittel in Klimaschutzprojekte in Entwicklungs- und Schwellenländern zu lenken und Reduktionen zu ermöglichen, die sonst nicht stattfinden würden (Violet George, 2023). Projekte zur **Kohlenstoffentfernung**, wie die Wiederherstellung von Wäldern und Mooren, gewinnen an Bedeutung. Beispielsweise zeigen Studien die Bedeutung der menschlich induzierten Regeneration von Naturwäldern für Kohlenstoffsenken in Australien (Macintosh et al., 2024). Solche naturbasierten Lösungen können nicht nur Kohlenstoff speichern, sondern auch Biodiversität fördern und Ökosystemleistungen verbessern (Tyagi & Haritash, 2024). Der Markt für Kohlenstoffentfernung wird sogar als potenzieller Billionen-Dollar-Markt gesehen (Violet George, 2023).

Allerdings sind Kohlenstoffkompensationen auch mit erheblichen Herausforderungen und Kritik verbunden (Skopek, 2010). Die wichtigste Kritik betrifft die **Zusätzlichkeit** (**Additionality**): Es muss sichergestellt werden, dass die Emissionsreduktion des Offset-Projekts tatsächlich zusätzlich zu dem ist, was ohnehin geschehen wäre. Weitere Bedenken betreffen die **Permanenz** (insbesondere bei Waldprojekten, die durch Brände oder Abholzung wieder Kohlenstoff freisetzen können), das **Leckagerisiko** (Verlagerung von Emissionen an einen anderen Ort) und die **Qualität der Projekte**. Die Notwendigkeit einer robusten Messung, Berichterstattung und Verifizierung (MRV) ist entscheidend für die Integrität des Offset-Marktes (Rickels et al., 2023). Trotz dieser Kritik spielen Offsets eine wichtige Rolle, um schwer vermeidbare Emissionen auszugleichen und Investitionen in Klimaschutz zu mobilisieren. Die Nutzung von Blockchain-Technologien könnte die Transparenz und Integrität in diesem Bereich verbessern (Merlo et al., 2025)(Jain et al., 2024).

1.3.4 Rolle von Blockchain-Technologien im Kohlenstoffmarkt Die digitale Transformation hat auch den Kohlenstoffmarkt erreicht, wobei **Blockchain-Technologien** als vielversprechende Lösungen zur Verbesserung der Transparenz, Effizienz und Integrität diskutiert werden (Merlo et al., 2025). Die dezentrale und manipulationssichere Natur

der Blockchain könnte einige der Kernprobleme von Kohlenstoffmärkten, insbesondere im Bereich der Kompensationen, adressieren.

Blockchain kann die **Verfolgung von Emissionszertifikaten und Offsets** von ihrer Generierung bis zu ihrer Stilllegung erheblich verbessern. Jede Transaktion wird in einem unveränderlichen Hauptbuch aufgezeichnet, was Betrug und Doppelzählung (Double Counting) erschwert. Dies ist besonders relevant für freiwillige Kohlenstoffmärkte, wo die Glaubwürdigkeit der Projekte oft in Frage gestellt wird (Skopek, 2010). Durch die Tokenisierung von Kohlenstoffzertifikaten könnten diese leichter und sicherer gehandelt werden, was die Liquidität und Effizienz des Marktes erhöht (Merlo et al., 2025).

Darüber hinaus könnten Smart Contracts auf Blockchain-Plattformen die Automatisierung von Prozessen ermöglichen, wie die Verifizierung von Emissionsreduktionen oder die Auszahlung von Geldern an Projektentwickler, sobald bestimmte Meilensteine erreicht sind. Dies könnte die Transaktionskosten senken und die Geschwindigkeit der Abwicklung erhöhen. Studien wie die von Merlo, Mendonça et al. (2025) (Merlo et al., 2025) und Jain, Parikh et al. (2024) (Jain et al., 2024) untersuchen das Potenzial von Blockchain für den Kohlenstoffmarkt und betonen ihre Fähigkeit, Vertrauen aufzubauen und die Datentransparenz zu verbessern. Insbesondere für Schwellenländer wie Indien wird Blockchain als Instrument zur Stärkung der Klimaschutzmaßnahmen diskutiert (Jain et al., 2024).

Trotz des vielversprechenden Potenzials gibt es auch Herausforderungen. Die Skalierbarkeit von Blockchain-Lösungen, der Energieverbrauch bestimmter Konsensmechanismen und die Notwendigkeit einer breiten Akzeptanz und Interoperabilität zwischen verschiedenen Plattformen müssen noch adressiert werden. Dennoch wird Blockchain als eine Schlüsseltechnologie angesehen, die die nächste Generation von Kohlenstoffmärkten prägen und deren Effektivität im Kampf gegen den Klimawandel steigern könnte.

1.4 Empirische Studien zur Wirksamkeit

Die theoretische Begründung für Kohlenstoffpreismechanismen ist robust, doch ihre tatsächliche Wirksamkeit in der Praxis ist Gegenstand umfangreicher empirischer Forschung. Diese Studien untersuchen, ob und in welchem Maße Kohlenstoffpreise tatsächlich zu Emissionsreduktionen führen, welche wirtschaftlichen Auswirkungen sie haben und wie sie technologische Innovationen beeinflussen.

1.4.1 Auswirkungen auf Emissionsreduktion Eine zentrale Frage ist, ob Kohlenstoffpreismechanismen tatsächlich zu einer signifikanten Reduktion von Treibhausgasemissionen führen. Die empirische Evidenz aus verschiedenen Jurisdiktionen ist weitgehend positiv, wenn auch mit unterschiedlichem Ausmaß der Wirksamkeit. Eine systematische Überprüfung und Metaanalyse von Ex-post-Evaluierungen von Klimaschutzpolitiken, wie die von Döbbeling-Hildebrandt, Miersch et al. (2024) (Döbbeling-Hildebrandt et al., 2024), zeigt, dass Kohlenstoffpreismechanismen im Allgemeinen effektiv sind, um Emissionen zu reduzieren.

Das **Europäische Emissionshandelssystem (EU ETS)** wird in zahlreichen Studien als wirksames Instrument zur Emissionsreduktion identifiziert. Klimko und Hasprová (2025) (Klimko & Hasprová, 2025) analysieren den Einfluss des EU ETS auf die Treibhausgasemissionen in der EU und kommen zu dem Schluss, dass es maßgeblich zu den beobachteten Reduktionen beigetragen hat, insbesondere in den Sektoren, die unter das System fallen. Die Effektivität wird jedoch durch Faktoren wie die Höhe des Kohlenstoffpreises, das Design des Systems (z.B. die Strenge des Caps) und die Wechselwirkung mit anderen Politiken beeinflusst (Digitemie & Ekemezie, 2024).

Auch das **chinesische Emissionshandelssystem (ETS)**, obwohl noch relativ jung, zeigt bereits positive Effekte. Zhang, Luo et al. (2024) (Zhang et al., 2024) untersuchen die Wirksamkeit und die Einflussfaktoren des chinesischen ETS und stellen fest, dass es einen signifikanten Beitrag zur Emissionsreduktion leistet. Eine weitere Studie von Luo

und Lim (2024) (Luo & Lim, 2024) bestätigt die emissionsmindernde Wirkung des chinesischen Kohlenstoffmarktes und identifiziert die wichtigsten Einflussfaktoren. Diese Erkenntnisse sind besonders relevant, da China der größte Emittent weltweit ist und sein ETS eine entscheidende Rolle im globalen Klimaschutz spielt.

In Kanada haben Kohlenstoffpreise ebenfalls zu Emissionsreduktionen beigetragen. Bello (2024) (Bello, 2024) analysiert die Kohlenstoffpreispolitik und Energieeffizienz in kanadischen Provinzen und findet positive Auswirkungen auf die Energieeffizienz und damit auf die Emissionsreduktion. Diese regionalen Beispiele unterstreichen die Anpassungsfähigkeit und Wirksamkeit von Kohlenstoffpreisen in verschiedenen nationalen und subnationalen Kontexten. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass ein angemessen hoher und stabiler Kohlenstoffpreis, kombiniert mit einem gut durchdachten Systemdesign, entscheidend für die Erzielung substanzialer Emissionsreduktionen ist.

1.4.2 Wirtschaftliche Auswirkungen und Innovation Neben der direkten Emissionsreduktion sind die wirtschaftlichen Auswirkungen von Kohlenstoffpreismechanismen ein wichtiges Untersuchungsfeld. Kritiker befürchten oft negative Auswirkungen auf die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen, das Wirtschaftswachstum und die Beschäftigung. Empirische Studien liefern jedoch ein differenziertes Bild.

Ein zentrales Argument für Kohlenstoffpreise ist ihre Fähigkeit, **technologische Innovationen** in kohlenstoffarmen Technologien anzureizen. Cheng und Jiang (2024) (Cheng & Jiang, 2024) untersuchen, wie Kohlenstoffmärkte die Entwicklung erneuerbarer Energien vorantreiben können. Ihre Ergebnisse deuten darauf hin, dass ein gut funktionierender Kohlenstoffmarkt Investitionen in erneuerbare Energien stimuliert, indem er die relative Wettbewerbsfähigkeit sauberer Technologien verbessert. Der Preis für Emissionen macht die Nutzung fossiler Brennstoffe teurer und schafft somit einen Anreiz, in Alternativen zu investieren. Dies ist ein entscheidender Mechanismus, um die Energiewende zu beschleunigen und langfristig eine dekarbonisierte Wirtschaft zu ermöglichen.

Studien zu den Auswirkungen auf die **Wettbewerbsfähigkeit** zeigen, dass die Effekte komplex sind und stark von der Gestaltung des Systems (z.B. kostenlose Zuteilung vs. Versteigerung, Grenzausgleichsmechanismen), der Höhe des Kohlenstoffpreises und der Intensität des internationalen Wettbewerbs abhängen. Während einige Sektoren kurzfristig unter höheren Kosten leiden können, können andere von der Förderung neuer Technologien und Märkten profitieren. Eine Studie von Chen (2024) (Chen, 2024) zur Pfadanalyse des Einflusses des Kohlenstoffmarktes auf die Kohlenstoffemissionen von Unternehmen zeigt, dass der Kohlenstoffmarkt die Emissionen von Unternehmen durch verschiedene Kanäle beeinflusst, einschließlich der Förderung von Innovation und der Anpassung von Produktionsprozessen.

Die Befürchtung des **Carbon Leakage**, d.h. der Verlagerung von Emissionen und Produktion in Länder mit weniger strengen Klimaschutzauflagen, ist ein wiederkehrendes Thema. Maßnahmen wie die kostenlose Zuteilung von Zertifikaten für energieintensive Industrien in den frühen Phasen des EU ETS oder der geplante CO2-Grenzausgleichsmechanismus (CBAM) der EU zielen darauf ab, dieses Risiko zu mindern und die Wettbewerbsfähigkeit heimischer Industrien zu schützen (Fan et al., 2022). Empirische Belege für großflächiges Carbon Leakage sind jedoch oft schwer zu erbringen und umstritten, da viele Faktoren die Standortentscheidungen von Unternehmen beeinflussen.

Die Auswirkungen auf das **Bruttoinlandsprodukt (BIP)** und die **Beschäftigung** werden ebenfalls untersucht. Während einige Modelle kurzfristige negative Effekte prognostizieren, zeigen andere, dass die Einnahmen aus der Kohlenstoffbepreisung durch Recyclingmechanismen (z.B. Steuersenkungen, Investitionen in grüne Infrastruktur) neutralisiert oder sogar in positive Effekte umgewandelt werden können. Die Schaffung neuer Arbeitsplätze im Bereich der erneuerbaren Energien und grünen Technologien kann negative Auswirkungen in traditionellen Sektoren teilweise kompensieren. Insgesamt deutet die Forschung darauf hin, dass Kohlenstoffpreismechanismen, wenn sie gut konzipiert und mit flankierenden Maßnah-

men versehen sind, sowohl Emissionsreduktionen als auch positive wirtschaftliche Dynamik, insbesondere im Bereich der Innovation, fördern können (Cheng & Jiang, 2024).

1.4.3 Verteilungswirkungen und soziale Gerechtigkeit Ein oft übersehener, aber zunehmend wichtiger Aspekt der empirischen Forschung zu Kohlenstoffpreismechanismen sind ihre **Verteilungswirkungen** und die damit verbundenen Fragen der **sozialen Gerechtigkeit**. Kohlenstoffpreise können unterschiedliche Auswirkungen auf verschiedene Einkommensgruppen und Regionen haben, was zu Bedenken hinsichtlich eines gerechten Übergangs führt (Harris & McCarthy, 2023).

Kohlenstoffpreise, insbesondere wenn sie auf fossile Brennstoffe angewendet werden, können zu höheren Preisen für Energie, Transport und bestimmte Güter führen. Dies kann Haushalte mit geringem Einkommen überproportional belasten, da sie einen größeren Anteil ihres Einkommens für diese Grundbedürfnisse ausgeben müssen (Bae, 2018). Bae (2018) (Bae, 2018) untersucht die Auswirkungen von Einkommensungleichheit auf CO₂-Emissionen unter verschiedenen Bedingungen und deutet an, dass die Verteilungswirkungen von Klimapolitiken sorgfältig bedacht werden müssen, um bestehende Ungleichheiten nicht zu verschärfen. Wenn die Einnahmen aus der Kohlenstoffbepreisung nicht angemessen zurückverteilt oder zur Unterstützung bedürftiger Haushalte verwendet werden, kann dies zu sozialem Widerstand und politischer Ablehnung führen, wie die Erfahrungen in einigen Ländern gezeigt haben (Sommer, 2015).

Um diesen negativen Verteilungswirkungen entgegenzuwirken, werden verschiedene Strategien diskutiert und implementiert:

- * **Einnahmenrecycling:** Die Einnahmen aus Kohlenstoffsteuern oder der Versteigerung von Emissionszertifikaten können genutzt werden, um einkommensschwache Haushalte direkt zu entlasten (z.B. durch Pauschalzahlungen oder Steuersenkungen) oder um Investitionen in öffentliche Verkehrsmittel und Energieeffizienzprogramme zu finanzieren, die allen zugutekommen (Chapatuka, 2025).
- * **Gerechter Übergang (Just Transition):** Dieses Konzept betont die Notwendigkeit, die sozialen

und wirtschaftlichen Auswirkungen des Übergangs zu einer kohlenstoffarmen Wirtschaft auf Arbeitnehmer und Gemeinden, die von emissionsintensiven Industrien abhängig sind, abzumildern (Harris & McCarthy, 2023). Dies kann Umschulungsprogramme, Investitionen in neue Industrien in betroffenen Regionen und soziale Sicherungssysteme umfassen. Harris und McCarthy (2023) (Harris & McCarthy, 2023) untersuchen die Frage eines gerechten Übergangs und betonen die Komplexität, zu definieren, was gerecht ist, für wen und mit welchen Mitteln. * **Differenzierte Preise oder Ausnahmen:** In einigen Fällen werden Ausnahmen oder niedrigere Kohlenstoffpreise für bestimmte Sektoren oder Verbrauchergruppen in Betracht gezogen, obwohl dies die Effizienz des Systems beeinträchtigen kann.

Die empirische Forschung zu den Verteilungswirkungen ist entscheidend, um Kohlenstoffpreismechanismen so zu gestalten, dass sie nicht nur ökologisch wirksam, sondern auch sozial gerecht sind. Die Akzeptanz dieser Politiken in der Bevölkerung hängt maßgeblich davon ab, wie gut diese sozialen Aspekte adressiert werden (Sommer, 2015).

1.5 Kritische Perspektiven und Herausforderungen

Trotz der breiten Akzeptanz von Kohlenstoffpreismechanismen als effektive Instrumente im Klimaschutz sind sie nicht frei von Kritik und stehen vor erheblichen Herausforderungen in ihrer Implementierung und Wirksamkeit. Diese kritischen Perspektiven sind entscheidend, um die Grenzen dieser Instrumente zu verstehen und zukünftige Politiken zu verbessern.

1.5.1 Preisvolatilität und Unsicherheit Ein wesentliches Problem, insbesondere bei Emissionshandelssystemen, ist die **Preisvolatilität** der Kohlenstoffzertifikate (Yu et al., 2022)(Liang et al., 2024). Der Preis für Emissionsrechte kann stark schwanken, beeinflusst durch eine Vielzahl von Faktoren wie wirtschaftliche Zyklen, politische Entscheidungen, Energiepreise und sogar unerwartete Ereignisse wie die COVID-19-Pandemie (Houballah et al., 2024). Diese Unsicherheit erschwert es Unternehmen, langfristige Investitionsentscheidungen

in emissionsmindernde Technologien zu treffen. Ein niedriger oder volatiler Kohlenstoffpreis schwächt den Anreiz zur Dekarbonisierung und kann die Wirksamkeit des Systems untergraben (Wang et al., 2023)(Liang et al., 2024).

Studien von Yu, Wang et al. (2022) (Yu et al., 2022) zur Volatilitätsanalyse des Kohlenstoffmarktes basierend auf strukturellen Brüchen und von Liang, Goodell et al. (2024) (Liang et al., 2024) zu den Auswirkungen von Kohlenstoffmarkt- und Klimapolitikunsicherheiten unterstreichen die Bedeutung dieses Problems. Die Unsicherheit über zukünftige politische Maßnahmen kann sich auch auf die Kohlenstoffmärkte auswirken und deren Stabilität beeinträchtigen (Wang et al., 2023). Um der Preisvolatilität entgegenzuwirken, wurden Mechanismen wie die Marktstabilitätsreserve (MSR) im EU ETS eingeführt, die darauf abzielt, das Überangebot an Zertifikaten zu reduzieren und so die Preisstabilität zu fördern (Perino & Willner, 2016). Doch selbst mit solchen Mechanismen bleibt die Steuerung der Preisentwicklung eine komplexe Aufgabe.

1.5.2 Carbon Leakage und Wettbewerbsbedenken Die Gefahr des **Carbon Leakage** ist eine der am häufigsten genannten kritischen Perspektiven. Carbon Leakage tritt auf, wenn strengere Klimaschutzauflagen in einer Region dazu führen, dass emissionsintensive Industrien ihre Produktion in Länder mit weniger strengen oder gar keinen Kohlenstoffpreisen verlagern (Qiu et al., 2024). Dies würde nicht nur die heimische Industrie schwächen und Arbeitsplätze gefährden, sondern auch zu keiner globalen Emissionsreduktion führen, sondern lediglich die Emissionen geografisch verlagern.

Um Carbon Leakage zu begegnen, wurden verschiedene Strategien entwickelt. Die **kostenlose Zuteilung** von Emissionszertifikaten an gefährdete Industrien ist eine weit verbreitete Maßnahme, die jedoch die Anreizwirkung des Kohlenstoffpreises abschwächt und zu Mitnahmeeffekten führen kann. Eine andere, zunehmend diskutierte Lösung ist der **CO2-Grenzausgleichsmechanismus (CBAM)**, wie er von der EU geplant wird. Der CBAM würde Importe aus Ländern mit weniger ambitionierten Klimapolitiken mit einem Aufschlag

belegen, der den Kohlenstoffkosten im Inland entspricht. Dies soll gleiche Wettbewerbsbedingungen schaffen und gleichzeitig Anreize für andere Länder setzen, ebenfalls Kohlenstoffpreise einzuführen (Durán, 2021). Die Implementierung eines CBAM ist jedoch komplex und wirft Fragen des internationalen Handelsrechts und der administrativen Umsetzbarkeit auf.

1.5.3 Gerechter Übergang und soziale Akzeptanz Wie bereits unter den Verteilungswirkungen erwähnt, ist die Frage eines **gerechten Übergangs (Just Transition)** von entscheidender Bedeutung für die soziale Akzeptanz von Kohlenstoffpreismechanismen (Harris & McCarthy, 2023). Wenn diese Politiken zu einer ungleichen Belastung der Bevölkerung führen, insbesondere von einkommensschwachen Haushalten oder von Regionen, die stark von fossilen Industrien abhängig sind, kann dies zu erheblichem Widerstand führen. Die “Gelbwesten”-Proteste in Frankreich, die durch eine Erhöhung der Kraftstoffsteuer ausgelöst wurden, sind ein prominentes Beispiel dafür, wie mangelnde Berücksichtigung sozialer Aspekte die politische Akzeptanz untergraben kann (Klimovich, 2024).

Um einen gerechten Übergang zu gewährleisten, müssen Kohlenstoffpreismechanismen durch flankierende soziale Maßnahmen ergänzt werden. Dazu gehören die Umverteilung von Einnahmen an betroffene Haushalte, Investitionen in Umschulung und Weiterbildung für Arbeitnehmer in schrumpfenden Sektoren, die Förderung neuer grüner Industrien in strukturschwachen Regionen und die Sicherstellung des Zugangs zu erschwinglichen, kohlenstoffarmen Alternativen (z.B. öffentlicher Nahverkehr, energieeffiziente Wohnungen) (Harris & McCarthy, 2023). Die Herausforderung besteht darin, Politiken zu gestalten, die sowohl ökologisch wirksam als auch sozial inklusiv sind, um die breite Unterstützung der Bevölkerung für den Klimaschutz zu sichern (Sommer, 2015).

1.5.4 Politische Machbarkeit und Governance-Herausforderungen Die Implementierung und Aufrechterhaltung von Kohlenstoffpreismechanismen sind oft mit erheblichen

politischen Herausforderungen verbunden. Die Einführung einer Kohlenstoffsteuer oder eines ETS erfordert politischen Willen und die Überwindung von Widerständen von Interessengruppen, die von den neuen Kosten betroffen sind (Sommer, 2015). Lobbying von emissionsintensiven Industrien kann zu Ausnahmen, niedrigeren Preisen oder einer großzügigeren Zuteilung von Zertifikaten führen, was die Wirksamkeit des Systems beeinträchtigt.

Darüber hinaus erfordert die Gestaltung und Verwaltung komplexer Kohlenstoffmärkte eine robuste **Governance-Struktur**. Dies umfasst die Festlegung und Anpassung des Caps, die Überwachung der Einhaltung, die Bekämpfung von Betrug und die Sicherstellung der Transparenz. Herman (2024) (Herman, 2024) untersucht die Rolle von Intermediären und die Komplexität bei der Bewertung von emissionsbasierten Governance-Strukturen. Die Notwendigkeit, das System kontinuierlich an neue wissenschaftliche Erkenntnisse, technologische Entwicklungen und wirtschaftliche Bedingungen anzupassen, erfordert flexible politische Prozesse (Perino & Willner, 2016). Die Erfahrungen in Deutschland zeigen, dass die Skalierung von Klimaschutzpolitiken eine sorgfältige Abwägung von politischen, wirtschaftlichen und sozialen Faktoren erfordert (Mineshima et al., 2021).

Ein weiteres Governance-Problem betrifft die Integrität von Kohlenstoffkompensationen, insbesondere im freiwilligen Markt. Die Sicherstellung der Zusätzlichkeit, Permanenz und Vermeidung von Doppeltzählung erfordert strenge Standards und unabhängige Verifizierungsprozesse (Skopek, 2010). Die variable Natur des Eigentums an Emissionseinheiten im internationalen Kontext wirft zudem komplexe rechtliche Fragen auf (Yliheljo, 2021).

1.5.5 Begrenzte Abdeckung und Notwendigkeit ergänzender Politiken Ein wesentlicher Kritikpunkt an Kohlenstoffpreismechanismen ist, dass sie oft nur einen Teil der gesamten Treibhausgasemissionen abdecken. Viele Sektoren, wie die Landwirtschaft, der internationale Schiffs- und Flugverkehr (außerhalb des EU ETS) oder kleinere Emittenten, sind oft von den Preismechanismen ausgenommen, was zu einem unvollständigen Anreizsys-

tem führt. Dies kann zu Verzerrungen und zu einer suboptimalen Emissionsreduktion insgesamt führen.

Darüber hinaus wird argumentiert, dass Kohlenstoffpreise allein möglicherweise nicht ausreichen, um die ambitionierten Klimaziele zu erreichen, insbesondere in Bereichen, in denen Marktversagen tiefgreifend sind oder wo nicht-monetäre Barrieren existieren (Bertram et al., 2014). Technologische Hürden, Infrastrukturdefizite oder Verhaltensbarrieren können durch einen Kohlenstoffpreis allein nicht ausreichend überwunden werden. Daher betonen viele Studien die Notwendigkeit **ergänzender Politiken**, um die Wirksamkeit von Kohlenstoffpreisen zu maximieren (Bertram et al., 2014). Dazu gehören: * **Investitionen in Forschung und Entwicklung:** Um die Kosten neuer kohlenstoffärmer Technologien zu senken und ihre Marktreife zu beschleunigen. * **Regulierungen und Standards:** Für Bereiche, die nicht von Kohlenstoffpreisen abgedeckt werden oder in denen ein direkterer Ansatz effektiver ist (z.B. Energieeffizienzstandards für Gebäude oder Fahrzeuge). * **Subventionen und Förderprogramme:** Für die Einführung und Skalierung von Schlüsseltechnologien wie erneuerbaren Energien oder Elektromobilität, insbesondere in der Anfangsphase. * **Infrastrukturprojekte:** Wie der Ausbau von Stromnetzen für erneuerbare Energien oder Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge. * **Informationskampagnen und Verhaltensänderungen:** Um das Bewusstsein zu schärfen und nachhaltigere Konsum- und Lebensstile zu fördern.

Bertram, Luderer et al. (2014) (Bertram et al., 2014) diskutieren, wie Technologiestrategien die Lücke im Klimaschutz schließen können, was die Bedeutung eines Policy-Mixes unterstreicht. Die Kombination von Kohlenstoffpreisen mit gezielten Regulierungen und Fördermaßnahmen kann eine synergetische Wirkung entfalten und den Übergang zu einer kohlenstoffarmen Wirtschaft beschleunigen. Die Komplexität liegt darin, diesen Policy-Mix so zu gestalten, dass er kohärent ist und unerwünschte Wechselwirkungen minimiert werden.

Die vorliegende Literaturübersicht hat die vielschichtige Landschaft der Kohlenstoffpreismechanismen beleuchtet, von ihren historischen Wurzeln im Kyoto-Protokoll und der

Etablierung des EU ETS bis hin zu ihren theoretischen Fundamenten in der Umweltökonomie. Sie hat die Funktionsweise von Kohlenstoffsteuern und Emissionshandelssystemen detailliert beschrieben, die Rolle von Kohlenstoffkompensationen und aufkommenden Technologien wie Blockchain erörtert. Die empirische Evidenz bestätigt weitgehend die Wirksamkeit dieser Mechanismen bei der Emissionsreduktion und der Förderung von Innovationen, weist aber auch auf komplexe wirtschaftliche und soziale Auswirkungen hin. Gleichzeitig wurden kritische Perspektiven und Herausforderungen wie Preisvolatilität, Carbon Leakage, Fragen des gerechten Übergangs und Governance-Probleme ausführlich diskutiert. Diese umfassende Analyse bildet die Grundlage für die weiteren Schritte dieser Arbeit, indem sie die Notwendigkeit eines differenzierten Verständnisses und einer kontinuierlichen Weiterentwicklung dieser zentralen Klimaschutzinstrumente hervorhebt.

Methodik

Die vorliegende Forschungsarbeit untersucht die Wirksamkeit von Kohlenstoffpreisinstrumenten im Kontext globaler Klimaschutzstrategien. Um eine fundierte und evidenzbasierte Analyse zu gewährleisten, bedarf es eines stringenten methodischen Ansatzes, der sowohl theoretische Fundierung als auch empirische Überprüfbarkeit sicherstellt. Dieser Abschnitt beschreibt detailliert den Analyserahmen, die Kriterien für die Auswahl der Fallstudien, die verwendeten Datenquellen und Messverfahren sowie die statistischen Methoden zur Wirksamkeitsanalyse. Ziel ist es, die Transparenz und Reproduzierbarkeit der Studie zu maximieren und die Validität der daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen zu untermauern. Der methodische Aufbau orientiert sich an etablierten Standards der empirischen Sozial- und Umweltforschung, um eine hohe wissenschaftliche Qualität zu erzielen und die Relevanz der Ergebnisse für die Klimapolitik zu gewährleisten. Die Auswahl der Methoden wurde sorgfältig getroffen, um die komplexen Zusammenhänge zwischen Kohlenstoffpreisen und Emissionsreduktionen adäquat erfassen zu können und gleichzeitig

kausale Schlussfolgerungen, wo immer möglich, zu ermöglichen (Döbbeling-Hildebrandt et al., 2024).

2.1 Analyserahmen für die Klimaschutzwirkung

Der Analyserahmen für die Bewertung der Klimaschutzwirkung von Kohlenstoffpreisinstrumenten basiert auf einem multidimensionalen Ansatz, der sowohl ökonomische als auch ökologische und sozioökonomische Aspekte berücksichtigt. Im Kern steht die Hypothese, dass die Bepreisung von Kohlenstoffemissionen über Mechanismen wie Emissionshandelssysteme (EHS) oder CO₂-Steuern einen Anreiz schafft, Emissionen zu reduzieren und Investitionen in kohlenstoffarme Technologien zu fördern (Xiong, 2024)(Conrad & Wang, 1995). Die Wirksamkeit wird dabei nicht nur anhand der direkten Reduktion von Treibhausgasemissionen (THG) gemessen, sondern auch durch die Analyse indirekter Effekte, wie technologische Innovation, Energieeffizienzsteigerung und strukturelle Veränderungen in der Wirtschaft (Winkler et al., 2010). Die Definition von “Klimaschutzwirkung” umfasst in dieser Studie die quantifizierbare Reduktion von THG-Emissionen, ausgedrückt in CO₂-Äquivalenten (CO₂e), sowie qualitative Indikatoren für die Dekarbonisierung und die Transformation hin zu einer nachhaltigeren Wirtschaft.

Ein zentraler Bestandteil des Analyserahmens ist die ökonomische Theorie der externen Kosten. THG-Emissionen stellen eine negative Externalität dar, deren Kosten nicht im Marktpreis reflektiert werden (Conrad & Wang, 1995). Kohlenstoffpreisinstrumente internalisieren diese externen Kosten, indem sie den Verursachern einen Preis für ihre Emissionen auferlegen. Dies führt theoretisch zu einer effizienteren Allokation von Ressourcen und zur Reduktion von Emissionen dort, wo es am kostengünstigsten ist (Winkler et al., 2010). Der Analyserahmen unterscheidet dabei zwischen zwei Haupttypen von Kohlenstoffpreisinstrumenten: dem Emissionshandel (Cap-and-Trade) und der CO₂-Steuer. Während der Emissionshandel eine Mengensteuerung darstellt, bei der eine Obergrenze für Emissionen festgelegt und Zertifikate gehandelt werden (Kreis-Hoyer, 2000)(Yliheljo, 2021), ist die

CO₂-Steuer ein Preissteuerungsinstrument, das einen festen Preis pro Tonne CO₂ festlegt (Conrad & Wang, 1995). Die Wahl des Instruments kann unterschiedliche Auswirkungen auf die Preisvolatilität und die Planungssicherheit für Unternehmen haben, was im Rahmen der Analyse berücksichtigt wird (Yu et al., 2022)(Liang et al., 2024).

Die Modellierung der Kausalzusammenhänge erfolgt unter Berücksichtigung verschiedener Einflussfaktoren, die die reine Preis-Emissions-Beziehung überlagern können. Dazu gehören makroökonomische Entwicklungen wie Wirtschaftswachstum, Industrieproduktion und Energiepreise, aber auch technologische Fortschritte und politische Rahmenbedingungen (Bae, 2018). Es ist entscheidend, diese Kovariaten in die Analyse einzubeziehen, um Scheinkorrelationen zu vermeiden und die isolierte Wirkung des Kohlenstoffpreises besser identifizieren zu können. Die Klimaschutzwirkung wird dabei als Nettoeffekt verstanden, der die durch das Instrument induzierten Emissionsreduktionen abzüglich potenzieller Leakage-Effekte und unerwünschter Nebenwirkungen berücksichtigt. Leakage-Effekte treten auf, wenn Emissionsreduktionen in einer Region durch Emissionszunahmen in einer anderen Region, die nicht dem Kohlenstoffpreis unterliegt, kompensiert werden, beispielsweise durch die Verlagerung von Produktionsstätten (Ekardt & Hennig, 2011). Die Identifizierung und Quantifizierung solcher Effekte ist methodisch anspruchsvoll, wird aber als wichtiger Indikator für die Gesamtwirksamkeit des Instruments betrachtet.

Darüber hinaus integriert der Analyserahmen eine Betrachtung der Verteilungswirkungen und der Akzeptanz der Instrumente. Eine effektive Klimapolitik muss nicht nur ökologisch wirksam, sondern auch sozial gerecht und wirtschaftlich tragfähig sein (Harris & McCarthy, 2023). Während ökonometrische Modelle primär die quantifizierbaren Emissionsreduktionen erfassen, wird die Diskussion der Ergebnisse auch qualitative Aspekte wie die Auswirkungen auf verschiedene Sektoren, die Innovationsanreize und die öffentliche Wahrnehmung einbeziehen (Chen, 2024). Dies ermöglicht eine umfassendere Bewertung der “Klimaschutzwirkung”, die über eine reine CO₂-Bilanz hinausgeht. Die Robustheit des Analyserahmens wird durch die Einbeziehung verschiedener theoretischer Perspektiven

und die Anwendung unterschiedlicher empirischer Methoden gestärkt, um die Komplexität der realen Welt adäquat abzubilden und valide Schlussfolgerungen zu ermöglichen (Döbbeling-Hildebrandt et al., 2024).

Analyserahmen für die Klimaschutzwirkung

Der folgende Analyserahmen illustriert die konzeptionellen Beziehungen und die zentralen Komponenten, die zur Bewertung der Klimaschutzwirkung von Kohlenstoffpreismechanismen in dieser Arbeit herangezogen werden. Er visualisiert die direkten und indirekten Einflussfaktoren sowie die angestrebten Ergebnisse.

Abbildung 1: Analyserahmen für die Klimaschutzwirkung von Kohlenstoffpreisen

Anmerkung: Die Abbildung zeigt den Wirkungszusammenhang von Kohlenstoffpreismechanismen. Ein klares Preissignal und ein festes Cap führen zu direkten Anreizen für Emissionsreduktionen. Dies wiederum stimuliert technologische Innovationen und strukturellen Wandel, welche die Klimaschutzwirkung verstärken. Sozioökonomische Faktoren wie Wettbewerbsfähigkeit und soziale Gerechtigkeit beeinflussen die Akzeptanz und somit die langfristige Wirksamkeit der Mechanismen.

2.2 Auswahlkriterien für Fallstudien

Die Untersuchung der Wirksamkeit von Kohlenstoffpreisinstrumenten erfordert eine sorgfältige Auswahl von Fallstudien, die repräsentative Einblicke in unterschiedliche Implementierungskontexte und deren Auswirkungen bieten. Für diese Studie wurden der Europäische Emissionshandel (EU ETS) und das kalifornische Cap-and-Trade-Programm als zentrale Fallstudien ausgewählt. Diese Wahl basiert auf einer Reihe von Kriterien, die darauf abzielen, eine tiefergehende vergleichende Analyse zu ermöglichen und die Übertragbarkeit der Erkenntnisse zu gewährleisten. Erstens sind beide Systeme etabliert und verfügen über eine ausre-

ichend lange Historie, um langfristige Trends und Wirkungszusammenhänge analysieren zu können (Klimko & Hasprová, 2025)(Asadnabizadeh & Moe, 2024). Die Datenverfügbarkeit über mehrere Jahre ist entscheidend für die Anwendung robuster ökonometrischer Methoden.

Zweitens repräsentieren der EU ETS und das kalifornische System zwei der größten und am längsten bestehenden Emissionshandelssysteme weltweit, die eine erhebliche Menge an THG-Emissionen abdecken und über umfangreiche Erfahrungen in der Gestaltung und Anpassung von Kohlenstoffpreisen verfügen (Asadnabizadeh & Moe, 2024). Der EU ETS ist das weltweit größte multinationale Emissionshandelssystem und deckt rund 40% der THG-Emissionen der EU ab, einschließlich der Sektoren Energieerzeugung, energieintensive Industrie und Luftverkehr (Klimko & Hasprová, 2025). Seine Größe, Komplexität und die wiederholten Reformen, wie die Einführung der Marktstabilitätsreserve (Perino & Willner, 2016), bieten wertvolle Einblicke in die Dynamik und Herausforderungen eines breit angelegten Kohlenstoffmarktes. Kalifornien hingegen bietet ein Beispiel für ein subnationales System, das in einen umfassenderen Klimaschutzrahmen eingebettet ist und Sektoren wie Stromerzeugung, Industrie und Verkehr abdeckt. Die Verknüpfung des kalifornischen Systems mit dem Québecer System (Bazelmans, 2008) bietet zudem eine Perspektive auf die Komplexität und die Potenziale von Linked Systems.

Drittens weisen beide Systeme spezifische Merkmale auf, die eine vergleichende Analyse besonders aufschlussreich machen. Der EU ETS operiert in einem supranationalen Kontext mit 27 Mitgliedstaaten und einer Vielzahl von nationalen Politiken, die interagieren können. Das kalifornische System agiert in einem föderalen Kontext innerhalb der USA, was unterschiedliche Governance-Strukturen und regulatorische Rahmenbedingungen mit sich bringt. Diese Unterschiede ermöglichen es, die Auswirkungen von institutionellen und politischen Kontextfaktoren auf die Wirksamkeit von Kohlenstoffpreisen zu untersuchen (Wang et al., 2023). Darüber hinaus haben beide Systeme unterschiedliche Ansätze in Bezug auf die Zuteilung von Zertifikaten (Versteigerung vs. freie Zuteilung), die Behandlung von Marktschwankungen und die Einbindung von Offset-Projekten (Skopek, 2010). Die Analyse dieser

Unterschiede ist entscheidend, um zu verstehen, welche Designmerkmale unter welchen Bedingungen am effektivsten sind.

Viertens sind die ausgewählten Fallstudien von hoher Relevanz für die globale Klimapolitik. Die Erfahrungen und Herausforderungen des EU ETS und des kalifornischen Systems können wertvolle Lehren für andere Regionen und Länder liefern, die die Einführung oder Weiterentwicklung eigener Kohlenstoffpreisinstrumente erwägen (Chapatuka, 2025)(Thamrin et al., 2025). Durch die Konzentration auf diese etablierten Systeme kann die Studie auf eine breite Basis an vorhandener Literatur und Daten aufbauen, was die Tiefe und Genauigkeit der Analyse erhöht (Döbbeling-Hildebrandt et al., 2024). Die Auswahl dieser Systeme ermöglicht es, die Forschungsfrage nach der Wirksamkeit von Kohlenstoffpreisinstrumenten unter verschiedenen institutionellen und sozioökonomischen Bedingungen umfassend zu beantworten und differenzierte Empfehlungen für die Gestaltung zukünftiger Klimapolitiken abzuleiten. Diese Begründung der Fallstudienauswahl stellt sicher, dass die empirische Analyse auf einer soliden Grundlage steht und die Ergebnisse maximale Relevanz für die akademische Diskussion und die politische Praxis besitzen.

2.3 Datenquellen und Messverfahren

Die Durchführung einer robusten Analyse der Klimaschutzwirkung von Kohlenstoffpreisinstrumenten erfordert den Zugang zu verlässlichen und umfassenden Daten. Für diese Studie werden primär quantitative Daten aus verschiedenen Quellen herangezogen, um eine trianguläre Datenbasis zu schaffen und die Validität der Ergebnisse zu erhöhen. Die Hauptkategorien der verwendeten Daten umfassen Emissionsdaten, Kohlenstoffpreisdaten, makroökonomische Indikatoren, Energiedaten und politische Rahmendaten.

Emissionsdaten stellen die zentrale abhängige Variable dar. Für den EU ETS werden die verifizierten Emissionen der erfassten Anlagen (in Tonnen CO₂e) von der Europäischen Umweltagentur (EUA) und der Europäischen Kommission bereitgestellt, die in der EUTL-Datenbank (Union Registry) öffentlich zugänglich sind. Diese Daten werden jährlich

gemeldet und umfassen detaillierte Informationen auf Anlagenebene, die eine Aggregation nach Sektoren und Ländern ermöglichen. Für das kalifornische Cap-and-Trade-Programm werden vergleichbare Daten vom California Air Resources Board (CARB) veröffentlicht. Die Emissionsdaten werden in CO₂-Äquivalenten erfasst, um die Vergleichbarkeit verschiedener Treibhausgase zu gewährleisten (Luo & Lim, 2024). Es wird darauf geachtet, konsistente Zeitreihen zu verwenden und gegebenenfalls Anpassungen für Änderungen im Geltungsbereich der Systeme vorzunehmen.

Kohlenstoffpreisdaten sind ebenfalls von entscheidender Bedeutung. Für den EU ETS werden die Spot- und Futures-Preise für EU Allowance (EUA)-Zertifikate von Finanzdatenanbietern und Börsen wie der European Energy Exchange (EEX) bezogen. Diese Daten sind in der Regel hochfrequent (täglich, wöchentlich) verfügbar, werden aber für die ökonometrische Analyse auf monatliche oder jährliche Durchschnittswerte aggregiert, um die Vergleichbarkeit mit den Emissionsdaten zu gewährleisten und kurzfristige Volatilitäten zu glätten (Yu et al., 2022). Ähnliche Preisdaten für kalifornische Carbon Allowances (CCA) werden von der Western Climate Initiative (WCI) und spezialisierten Datenanbietern bezogen. Die Erfassung der Preise erfolgt in Euro pro Tonne CO₂e bzw. US-Dollar pro Tonne CO₂e, wobei Wechselkurse für die Vergleichbarkeit berücksichtigt werden. Bei CO₂-Steuern werden die jeweiligen Steuersätze pro Tonne CO₂e direkt aus den Gesetzestexten und offiziellen Berichten der Regierungen entnommen.

Makroökonomische und energiewirtschaftliche Indikatoren dienen als wichtige Kontrollvariablen, um die Effekte des Kohlenstoffpreises von anderen wirtschaftlichen und strukturellen Einflüssen zu isolieren. Dazu gehören das Bruttoinlandsprodukt (BIP), die Industrieproduktion, die Bevölkerungsentwicklung, die Arbeitslosigkeit und der Energieverbrauch (aufgeschlüsselt nach Energieträgern und Sektoren). Diese Daten werden von etablierten internationalen Organisationen wie Eurostat, der Weltbank, dem Internationalen Währungsfonds (IWF) und der Internationalen Energieagentur (IEA) bezogen. Die Zeitreihen dieser Indikatoren werden mit den Emissions- und Preisdaten abgeglichen, um eine konsistente

Datenbasis zu schaffen. Die Auswahl der spezifischen Indikatoren erfolgt auf Basis der relevanten Literatur und theoretischer Überlegungen zu den Treibern von Emissionen (Bae, 2018).

Zusätzlich werden qualitative Daten und Informationen aus politischen Dokumenten und Berichten zur Analyse der institutionellen Rahmenbedingungen und Reformen der Kohlenstoffpreisinstrumente herangezogen. Dies umfasst Gesetzesänderungen, die Einführung von Marktstabilitätsreserven (Perino & Willner, 2016), die Festlegung von Obergrenzen (Caps) und die Zuteilungsregeln. Diese Informationen sind wichtig, um strukturelle Brüche und Diskontinuitäten in den Zeitreihen zu identifizieren, die die Wirksamkeitsanalyse beeinflussen können (Yu et al., 2022). Die Datenbereinigung und -validierung umfassen die Überprüfung auf Vollständigkeit, Konsistenz und Ausreißer. Fehlende Datenpunkte werden, wo angemessen, durch Interpolation oder andere statistische Methoden behandelt, wobei die Auswirkungen auf die Analyse transparent gemacht werden. Alle Daten werden in einer standardisierten Form aufbereitet, um die Kompatibilität für die statistische Analyse zu gewährleisten.

2.4 Statistische Methoden zur Wirksamkeitsanalyse

Um die Klimaschutzwirkung der Kohlenstoffpreisinstrumente fundiert zu analysieren, wird ein Mix aus ökonometrischen und statistischen Methoden angewendet. Die primäre Herausforderung besteht darin, kausale Zusammenhänge zwischen der Einführung und dem Preis von Kohlenstoff und den beobachteten Emissionsreduktionen zu identifizieren, während gleichzeitig andere Einflussfaktoren kontrolliert werden.

Ein zentraler Ansatzpunkt ist die **Paneldatenanalyse**. Da sowohl der EU ETS als auch das kalifornische System über mehrere Jahre hinweg Daten für verschiedene Länder (im Falle des EU ETS) oder Sektoren (in beiden Fällen) liefern, eignen sich Panelmodelle hervorragend, um sowohl zeitliche als auch querschnittliche Variationen zu berücksichtigen (Döbbeling-Hildebrandt et al., 2024). Modelle mit festen Effekten (Fixed Effects Model)

werden eingesetzt, um unbeobachtete, zeitinvariante Heterogenität zwischen den Einheiten (Länder/Sektoren) zu kontrollieren. Dies ist entscheidend, da Länder oder Sektoren unterschiedliche Ausgangsbedingungen, Wirtschaftsstrukturen oder Präferenzen aufweisen können, die die Emissionsentwicklung beeinflussen, aber nicht direkt messbar sind. Die allgemeine Form des Modells wäre: $E_{it} = \alpha_i + \delta_t + \beta_1 P_{it} + \beta_2 X_{it} + \epsilon_{it}$ Hierbei ist E_{it} die Emission in Einheit i zum Zeitpunkt t , P_{it} der Kohlenstoffpreis, X_{it} ein Vektor von Kontrollvariablen (z.B. BIP, Industrieproduktion, Energieverbrauch), α_i der einheitsspezifische feste Effekt, δ_t der zeitspezifische feste Effekt und ϵ_{it} der Fehlerterm. Die Koeffizienten β_1 und β_2 geben die marginale Wirkung der jeweiligen Variablen an.

Des Weiteren wird der **Difference-in-Differences (DiD)-Ansatz** verwendet, insbesondere zur Bewertung der Einführung oder signifikanter Reformen der Kohlenstoffpreisinstrumente. Dieser Ansatz vergleicht die Veränderung der Emissionen in einer “Behandlungsgruppe” (z.B. Länder oder Sektoren, die dem Kohlenstoffpreis unterliegen) mit der Veränderung in einer “Kontrollgruppe” (Länder oder Sektoren ohne Kohlenstoffpreis oder mit einer anderen Politik), und zwar vor und nach der Einführung des Instruments (Döbbeling-Hildebrandt et al., 2024). Die Gültigkeit des DiD-Ansatzes hängt von der parallele-Trends-Annahme ab, d.h., dass die Behandlungsgruppe und die Kontrollgruppe ohne die Intervention eine ähnliche Emissionsentwicklung gehabt hätten. Diese Annahme wird durch visuelle Inspektion der Trends und statistische Tests überprüft. Der DiD-Ansatz ist besonders nützlich, um kausale Effekte zu isolieren, indem er potenzielle Verzerrungen durch zeittypische Effekte und unbeobachtete Heterogenität reduziert. Für die Fallstudien können hierbei Sektoren oder Länder innerhalb der EU, die nicht vom ETS betroffen sind (oder erst später), als Kontrollgruppen dienen, oder auch Vergleichsregionen für Kalifornien.

Um die dynamischen Effekte und möglichen Verzögerungen in der Wirkung der Kohlenstoffpreise zu erfassen, werden **Zeitreihenanalysen** und **Vektorautoregressionsmodelle (VAR)** eingesetzt. Diese Modelle ermöglichen die Untersuchung von Impulsantwortfunktionen, die zeigen, wie sich ein Schock im Kohlenstoffpreis über die

Zeit auf die Emissionen und andere makroökonomische Variablen auswirkt. Die Analyse von Kointegrationsbeziehungen kann Aufschluss über langfristige Gleichgewichtsbeziehungen zwischen Kohlenstoffpreisen und Emissionen geben. Insbesondere die Analyse von Volatilitäten und Spillovers zwischen verschiedenen Märkten und Politikunsicherheiten wird mit Blick auf die Studien von (Wang et al., 2023), (Yu et al., 2022), (Liang et al., 2024) relevant sein. Die Untersuchung von strukturellen Brüchen in den Zeitreihen ist ebenfalls von Bedeutung, um die Auswirkungen von politischen Reformen (z.B. der Marktstabilitätsreserve im EU ETS (Perino & Willner, 2016)) oder externen Schocks (z.B. Finanzkrisen) zu berücksichtigen.

Für die Robustheit der Ergebnisse werden verschiedene **Sensitivitätsanalysen** durchgeführt. Dazu gehören die Verwendung alternativer Spezifikationen der Modelle (z.B. die Einbeziehung weiterer Kontrollvariablen, die Verwendung von verzögerten Variablen), alternative Schätzmethoden (z.B. GMM-Schätzer zur Behandlung von Endogenitätsproblemen) und die Berücksichtigung unterschiedlicher Stichprobenperioden oder Subgruppen. Die Robustheit der Standardfehler wird durch Cluster-Standardfehler (auf Länder- oder Sektorebene) oder heteroskedastie-robuste Standardfehler sichergestellt. Die statistische Signifikanz der Ergebnisse wird auf den üblichen Niveaus (1%, 5%, 10%) bewertet. Die Datenanalyse wird hauptsächlich mit statistischer Software wie R und Stata durchgeführt. Diese Programme bieten umfassende Funktionen für Paneldatenanalysen, Zeitreihenmodelle und robuste Fehlerberechnungen. Die Visualisierung der Ergebnisse mittels Grafiken und Tabellen wird dazu beitragen, die Komplexität der Daten verständlich darzustellen und die wichtigsten Erkenntnisse hervorzuheben. Die Einhaltung dieser statistischen Standards gewährleistet, dass die abgeleiteten Schlussfolgerungen zur Wirksamkeit von Kohlenstoffpreisinstrumenten wissenschaftlich fundiert und belastbar sind und eine solide Basis für politische Empfehlungen bieten.

Die Methodik ist darauf ausgelegt, eine umfassende Bewertung der Klimaschutzwirkung zu ermöglichen, indem sie die Stärken verschiedener quantitativer

Ansätze kombiniert und gleichzeitig die Limitationen der empirischen Forschung in diesem komplexen Feld transparent macht. Die sorgfältige Auswahl der Fallstudien, die Nutzung vielfältiger Datenquellen und die Anwendung robuster statistischer Methoden sind essenziell, um valide und übertragbare Ergebnisse zu erzielen, die zur Weiterentwicklung effektiver Klimapolitiken beitragen können.

Schritte der Methodik zur Wirksamkeitsanalyse

Die folgende Tabelle fasst die wichtigsten Schritte und ihre jeweiligen Implementierungsdetails der Methodik zusammen, um die Wirksamkeit von Kohlenstoffpreisinstrumenten umfassend zu analysieren.

Tabelle 2: Schritte der Methodik zur Wirksamkeitsanalyse

| Phase | Schritt | Beschreibung | Datenquellen | Methoden | Erwartetes Ergebnis |
|---------------|----------------------|------------------|--------------------|--------------------|--------------------------|
| 1. | Definition | Festlegung | Literatur, | Konzeptualisierung | Modell der Klagen |
| Vor- | Analyserahmen | theoretischer | Wirtschaftstheorie | | Wirkungszusammenhänge. |
| bere- | | Grundlagen & | | | |
| itung | | Hypothesen. | | | |
| | Auswahl | Auswahl | Systemberichte | Kriterienbasierter | Repräsentative |
| | Fallstudien | relevanter EHS | Fachliteratur | Auswahl | Systeme für |
| | | (EU ETS, | | | tiefergehende Analyse. |
| | | Kalifornien) | | | für |
| | | Analysen. | | | |
| 2. | Emissionsdaten | FHG-Emissionen | EUA, | Datenextraktion | Inkonsistente Zeitreihen |
| Daten- | erheben | (CO2e) für | CARB, | | von Emissionsdaten. |
| er- | | relevante | EUTL- | | |
| fas- | | Sektoren/Länder. | Datenbank | | |
| sung | | | | | |

| Phase | Schritt | Beschreibung | Datenquellen | Methoden | Erwartetes Ergebnis |
|-----------|---------------------------------------|--|---|--------------------------------------|---|
| | Kohlenstoffpreisdaten erheben | Futures-Preise (EUA, CCA), CO2-Steuersätze. | EEX, WCI, Regierungsberichte | Datenaggregation | Zentren der Kohlenstoffpreise. |
| | Makroökonomische Daten erheben | BIP und Industriproduktion, Energieverbrauch, etc. | Eurostat, Weltbank, IWF, IEA | Datenbereinigung | Kontrollvariablen für ökonometrische Modelle. |
| | Politische Rahmenbedingungen erfassen | Reformen, Caps, Zuteilungsregeln, Marktstabilitätsmechanismen. | Offizielle Dokumente, Beispiele. | Qualitative Analyse | Kontext für strukturelle Brüche & Reformen. |
| 3. | Analysen | Paneldatenanalyse | Schätzung der Wirkung von Kohlenstoffpreisen unter Kontrolle von Effekten. | Alle quantitativen Daten | Feste Effekte, Zufällige Effekte |
| | Difference-in-Differences (DiD) | Bewertung der Einflussnahme/Reformen von EHS. | Emissionsdaten, Politikdaten | DiD-Modelle, Parallel-Trends-Test | Isolierung des Effekts spezifischer Interventionen. |
| | Zeitreihenanalyse (VAR) | Untersuchung dynamischer Effekte & Kointegrationsbeziehungen. | Preis-, Emissions-, Makrodaten | VAR-Modelle, Impulsantwortfunktionen | Dynamische Reaktionen & langfristige Beziehungen. |

| Phase | Schritt | Beschreibung | Datenquellen | Methoden | Erwartetes Ergebnis |
|------------------|-------------|---|--|---------------------------------------|---|
| | | Sensitivitätsanalyse Überprüfung der Robustheit der Ergebnisse. | Alle quantitativen Daten | Alternative Spezifikationen, Schätzer | Bestätigung der Robustheit der Hauptergebnisse. |
| 4. | In- | Ergebnisse Diskussion der interpretieren statistischen Ergebnisse im Kontext der Theorie. | Statistische Modelle, Literatur | Vergleichende Analyse | Fundierte Schlussfolgerungen zur Wirksamkeit. |
| Iteration | pre- | Qualitative Einbeziehung Kontextualisierung, wirtschaftlicher & politischer Faktoren. | Politische Rahmen- daten, Experteninterviews | Qualitative Bewertung | Umfassendes Verständnis der Gesamtwirkung. |
| | | | | [VERIFY] | |

Anmerkung: Diese Schritte gewährleisten eine systematische und robuste Untersuchung der Forschungsfrage. Die Iteration zwischen den Phasen ist möglich, um die Modellierung zu verfeinern.

Der Emissionshandel hat sich als eines der zentralen marktisierten Instrumente in der globalen Klimapolitik etabliert, um die Reduktion von Treibhausgasemissionen kosteneffizient zu fördern (Kreis-Hoyer, 2000)(Winkler et al., 2010). Diese Analyse widmet sich einer umfassenden Untersuchung der Wirksamkeit von CO2-Handelssystemen, ihrer zugrunde liegenden Preisbildungs- und Marktmechanismen sowie spezifischer Fallstudien, die ihre praktische Anwendung und Herausforderungen beleuchten. Des Weiteren wird der CO2-Handel

im Kontext anderer Klimaschutzinstrumente vergleichend betrachtet und die empirische Evidenz seiner Klimaschutzwirkung kritisch bewertet. Ziel ist es, ein differenziertes Bild der Stärken, Schwächen und des Potenzials dieses Instruments im Kampf gegen den Klimawandel zu zeichnen.

Emissionsreduktionen durch CO₂-Handel

Der Kern des Emissionshandels, insbesondere in einem Cap-and-Trade-System, liegt in der Schaffung eines Marktes für das Recht, Treibhausgase zu emittieren. Eine Obergrenze (Cap) für die Gesamtemissionen wird festgelegt, und die entsprechenden Emissionsrechte werden in Form von Zertifikaten an Emittenten ausgegeben (Kreis-Hoyer, 2000). Diese Zertifikate können gehandelt werden, wodurch ein Preis für CO₂-Emissionen entsteht, der Unternehmen Anreize bietet, ihre Emissionen zu reduzieren. Die Effizienz dieses Ansatzes resultiert aus der Annahme, dass Unternehmen, die ihre Emissionen kostengünstig reduzieren können, dies tun und überschüssige Zertifikate verkaufen, während Unternehmen mit höheren Reduktionskosten Zertifikate zukaufen (Conrad & Wang, 1995). Dieser Mechanismus führt zu einer gesamtwirtschaftlich kostengünstigen Emissionsminderung, da die Reduktionen dort erfolgen, wo sie am billigsten sind (Conrad & Wang, 1995)(Winkler et al., 2010).

Die theoretische Grundlage des Emissionshandels basiert auf der Pigou-Steuer, die externe Kosten internalisiert, sowie auf dem Coase-Theorem, das besagt, dass bei klar definierten Eigentumsrechten und geringen Transaktionskosten eine effiziente Allokation von Ressourcen durch Verhandlungen erreicht werden kann (Kreis-Hoyer, 2000). Im Kontext des Klimaschutzes bedeutet dies, dass das Recht, CO₂ zu emittieren, zu einem Gut wird, das einen Preis hat. Dieser Preis motiviert Unternehmen, in emissionsmindernde Technologien und Prozesse zu investieren, um Kosten zu sparen oder Einnahmen durch den Verkauf überschüssiger Zertifikate zu generieren (Digitemie & Ekemezie, 2024). Die Dynamik des Zertifikatspreises spielt dabei eine entscheidende Rolle. Ein höherer Preis für CO₂-Zertifikate

verstärkt den Anreiz zur Emissionsreduktion und fördert Investitionen in kohlenstoffarme Technologien (Cheng & Jiang, 2024).

Ein wesentlicher Vorteil des Cap-and-Trade-Systems ist seine garantierte Emissionsreduktion, sofern das Cap adäquat festgelegt und durchgesetzt wird. Im Gegensatz zu einer CO₂-Steuer, deren Wirkung auf die Emissionen von der Preiselastizität der Nachfrage abhängt, legt der Emissionshandel eine absolute Obergrenze fest (Conrad & Wang, 1995). Die Herausforderung besteht jedoch darin, das Cap ambitioniert genug zu gestalten, um signifikante Reduktionen zu erzielen, ohne die Wirtschaft zu überfordern. Historisch gesehen haben viele Emissionshandelssysteme, insbesondere das EU-Emissionshandelssystem (EU ETS) in seinen frühen Phasen, mit einer Überallokation von Zertifikaten zu kämpfen gehabt, was zu niedrigen Preisen und einer geringeren Reduktionswirkung führte (Perino & Willner, 2016). Die Einführung von Mechanismen wie der Marktstabilitätsreserve (MSR) im EU ETS zielte darauf ab, solche Überschüsse zu steuern und die Marktstabilität zu verbessern.

Die Messung des Erfolgs von Emissionshandelssystemen bei der Reduktion von Emissionen ist komplex. Es erfordert kontrafaktische Analysen, um zu bestimmen, wie sich die Emissionen ohne das System entwickelt hätten. Studien nutzen oft ökonometrische Modelle, um den kausalen Zusammenhang zwischen der Implementierung eines ETS und den beobachteten Emissionsminderungen zu isolieren (Digitemie & Ekemezie, 2024)(Döbbeling-Hildebrandt et al., 2024). Diese Analysen berücksichtigen eine Vielzahl von Faktoren, die Emissionen beeinflussen, wie Wirtschaftswachstum, Energiepreise, technologische Fortschritte und andere politische Maßnahmen. Eine Meta-Analyse von Ex-post-Evaluierungen des CO₂-Preises hat gezeigt, dass die meisten Studien eine positive Wirkung auf die Emissionsreduktion feststellen, wobei die Höhe der Wirkung je nach Design und Kontext des Systems variiert (Döbbeling-Hildebrandt et al., 2024).

Trotz der potenziellen Vorteile gibt es auch Herausforderungen und Limitationen. Das Phänomen des “Carbon Leakage”, bei dem Unternehmen ihre Produktion in Länder mit weniger strengen Klimaschutzauflagen verlagern, kann die Wirksamkeit des Emission-

shandels untergraben (Emeka-Okoli et al., 2024). Um dem entgegenzuwirken, wurden Mechanismen wie der Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) im EU ETS eingeführt, der Importe aus Ländern ohne vergleichbare CO₂-Bepreisung mit einer Abgabe belegt. Ein weiteres Problem ist die Preisvolatilität, die Investitionsentscheidungen erschweren und die Planungssicherheit für Unternehmen mindern kann (Yu et al., 2022). Politische Unsicherheiten bezüglich der zukünftigen Ausgestaltung des Caps und anderer klimapolitischer Maßnahmen können ebenfalls die Marktpreise beeinflussen und die Wirksamkeit beeinträchtigen (Wang et al., 2023)(Liang et al., 2024).

Die sektorale Abdeckung von Emissionshandelssystemen variiert ebenfalls und beeinflusst die Reduktionspotenziale. Das EU ETS konzentriert sich beispielsweise auf energieintensive Industrien und den Stromsektor, während andere Sektoren wie Verkehr und Gebäude erst später oder über separate Mechanismen einbezogen wurden. Die Einbeziehung weiterer Sektoren, wie Landnutzung oder Abfallwirtschaft, stellt aufgrund der komplexen Messbarkeit und Zurechenbarkeit von Emissionen besondere Herausforderungen dar (Ekardt & Hennig, 2011). Nichtsdestotrotz zeigen Fallstudien und empirische Analysen, dass in den abgedeckten Sektoren signifikante Emissionsreduktionen erzielt werden können, insbesondere wenn das System über ausreichend lange Zeiträume etabliert ist und politische Unterstützung erfährt (Klimko & Hasprová, 2025)(Zhang et al., 2024). Die Anpassung des Systems an sich ändernde wirtschaftliche und politische Rahmenbedingungen ist dabei entscheidend für seinen langfristigen Erfolg (Perino & Willner, 2016).

Die Diskussion um die Wirksamkeit des CO₂-Handels ist auch eng mit der Frage der Innovation verknüpft. Durch die Bepreisung von Emissionen erhalten Unternehmen einen kontinuierlichen Anreiz, in Forschung und Entwicklung emissionsarmer Technologien zu investieren. Dies kann zu disruptiven Innovationen führen, die nicht nur die Kosten der Emissionsminderung senken, sondern auch neue Wachstumschancen eröffnen (Cheng & Jiang, 2024). Der Emissionshandel stimuliert somit nicht nur die Adoption bestehender sauberer Technologien, sondern auch die Schaffung neuer Lösungen, die für eine tiefgreifende

Dekarbonisierung unerlässlich sind. Die langfristige Perspektive und die Glaubwürdigkeit des politischen Rahmens sind dabei entscheidend, um diese Innovationsanreize voll zu entfalten.

Ablauf des Emissionshandelssystems (Cap-and-Trade)

Der folgende Prozessfluss illustriert die grundlegende Funktionsweise eines Cap-and-Trade-Emissionshandelssystems, von der Festlegung der Obergrenze bis zum Handel und der Stilllegung von Emissionszertifikaten.

Abbildung 2: Ablauf des Emissionshandelssystems (Cap-and-Trade)

Anmerkung: Die Abbildung verdeutlicht den Kreislauf eines Emissionshandelssystems.

Durch die Begrenzung der Gesamtmenge an Emissionen wird ein Preis für CO₂ geschaffen, der Unternehmen motiviert, ihre Emissionen zu reduzieren und am Markt zu handeln, um die Reduktionsziele kosteneffizient zu erreichen.

Preisgestaltung und Marktmechanismen

Die Preisgestaltung von CO₂-Emissionszertifikaten ist das Herzstück eines jeden Handelssystems und entscheidend für dessen Wirksamkeit und Akzeptanz. Der Preis wird durch das Zusammenspiel von Angebot und Nachfrage bestimmt. Das Angebot wird durch die festgelegte Obergrenze (Cap) der Zertifikate und deren Verteilung (Auktionierung, kostenlose Zuteilung) definiert (Kreis-Hoyer, 2000). Die Nachfrage hingegen ergibt sich aus den Emissionsminderungsbedürfnissen der regulierten Unternehmen. Diese dynamische Interaktion führt zu einer kontinuierlichen Preisanpassung, die Unternehmen Signale für ihre Investitions- und Produktionsentscheidungen sendet (Digitemie & Ekemezie, 2024).

Eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst die Volatilität und Höhe des CO₂-Preises. Wirtschaftliche Aktivitäten spielen eine primäre Rolle: In Zeiten des Wirtschaftswachstums steigt in der Regel die Energienachfrage und damit die Emissionen, was die Nachfrage nach Zertifikaten erhöht und den Preis steigen lässt. Umgekehrt können Wirtschaftsschwünge,

wie die Finanzkrise 2008 oder die COVID-19-Pandemie, zu einem Nachfragerückgang und einem Preisverfall führen (Houballah et al., 2024). Auch die Preise für fossile Brennstoffe sind von Bedeutung; höhere Gas- oder Kohlepreise können die Wirtschaftlichkeit von emissionsintensiven Anlagen beeinflussen und somit die Nachfrage nach CO₂-Zertifikaten verändern. Politische Entscheidungen, wie die Anpassung des Caps, die Einführung neuer Klimaschutzgesetze oder die Verknüpfung mit anderen Handelssystemen, haben ebenfalls erhebliche Auswirkungen auf die Preiserwartungen (Wang et al., 2023)(Liang et al., 2024).

Um der Preisvolatilität und potenziellen Marktverzerrungen entgegenzuwirken, wurden in verschiedenen Emissionshandelssystemen Mechanismen zur Preisstabilisierung implementiert. Ein prominentes Beispiel ist die Marktstabilitätsreserve (MSR) im EU ETS, die 2019 eingeführt wurde (Perino & Willner, 2016). Die MSR passt das Volumen der zur Versteigerung stehenden Zertifikate automatisch an, indem sie bei einem Überschuss von Zertifikaten im Markt einen Teil davon in die Reserve überführt und bei einem Mangel Zertifikate freigibt. Dies soll dazu beitragen, das Gleichgewicht zwischen Angebot und Nachfrage zu stabilisieren und extrem niedrige oder hohe Preise zu vermeiden, die Investitionsentscheidungen erschweren könnten (Perino & Willner, 2016). Solche Mechanismen sind entscheidend, um Vertrauen in den Markt zu schaffen und eine langfristige Planbarkeit für Unternehmen zu gewährleisten.

Die Art der Zuteilung von Emissionszertifikaten hat ebenfalls einen signifikanten Einfluss auf die Preisbildung und die Verteilungswirkung des Systems. Ursprünglich wurden im EU ETS viele Zertifikate kostenlos zugeteilt, um die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen zu schützen und Carbon Leakage zu vermeiden. Dies führte jedoch oft zu Windfall Profits für Unternehmen, die ihre Emissionen leicht reduzieren konnten. Eine zunehmende Umstellung auf Auktionierung, bei der Unternehmen Zertifikate kaufen müssen, gilt als effizienter und gerechter, da sie Einnahmen für den Staat generiert, die für Klimaschutzmaßnahmen oder zur Entlastung der Bürger verwendet werden können (Chapatuka, 2025). Die Einnahmen aus der Auktionierung können auch zur Förderung erneuerbarer Energien und Energieeffizienz

eingesetzt werden, was wiederum die Nachfrage nach CO₂-Zertifikaten langfristig senkt und den Übergang zu einer kohlenstoffarmen Wirtschaft beschleunigt (Cheng & Jiang, 2024).

Die Verknüpfung von Emissionshandelssystemen (Linking) ist ein weiterer wichtiger Marktmechanismus. Durch die Verbindung verschiedener Systeme, wie beispielsweise des EU ETS mit dem Schweizer ETS (Bazelmans, 2008), entsteht ein größerer und liquiderer Markt. Dies kann die Kosteneffizienz erhöhen, da Unternehmen Zugang zu einem breiteren Spektrum von Reduktionsoptionen erhalten und Preisunterschiede zwischen Regionen ausgeglichen werden. Allerdings birgt Linking auch Herausforderungen, da Unterschiede im Design, in der Ambition und in den Governance-Strukturen der beteiligten Systeme berücksichtigt werden müssen (Bazelmans, 2008). Eine erfolgreiche Verknüpfung erfordert eine sorgfältige Harmonisierung und gegenseitige Anerkennung von Zertifikaten.

Die Rolle von Zwischenhändlern und Finanzinstrumenten im CO₂-Markt ist ebenfalls von Bedeutung. Banken, Broker und andere Finanzinstitute erleichtern den Handel mit Zertifikaten, bieten Hedging-Strategien an und tragen zur Liquidität des Marktes bei (Herman, 2024). Der Emissionshandel hat sich zu einem komplexen Finanzmarkt entwickelt, der Derivate, Futures und Optionen umfasst, die es den Akteuren ermöglichen, Preisrisiken zu managen und Spekulationsmöglichkeiten zu nutzen. Diese Finanzialisierung des CO₂-Marktes kann zwar die Effizienz und Liquidität erhöhen, birgt aber auch Risiken wie übermäßige Spekulation und Manipulation, die die Preisbildung verzerren könnten.

Zukünftige Entwicklungen im Bereich der Marktmechanismen könnten auch den Einsatz von Blockchain-Technologien umfassen (Merlo et al., 2025)(Jain et al., 2024). Blockchain bietet das Potenzial, die Transparenz, Sicherheit und Effizienz des Handels mit Emissionszertifikaten zu erhöhen, indem es ein dezentrales, unveränderliches Register aller Transaktionen bereitstellt. Dies könnte dazu beitragen, Betrug zu reduzieren, die Nachverfolgbarkeit von Zertifikaten zu verbessern und die Abwicklung von Transaktionen zu beschleunigen. Insbesondere im Kontext von freiwilligen Kohlenstoffmärkten und Offsets, wo Integrität und Vertrauen entscheidend sind, könnte Blockchain eine wichtige Rolle spielen (Jain et al., 2024).

Die Preisgestaltung im CO₂-Handel ist somit ein vielschichtiges Phänomen, das von ökonomischen, politischen und technologischen Faktoren beeinflusst wird. Die Implementierung robuster Marktmechanismen und die kontinuierliche Anpassung des Systemdesigns sind entscheidend, um einen stabilen, effizienten und wirksamen CO₂-Preis zu gewährleisten, der die notwendigen Anreize für eine tiefgreifende Dekarbonisierung setzt.

Fallstudien (EU ETS, Kalifornien, China)

Die Analyse konkreter Fallstudien liefert wertvolle Einblicke in die praktische Funktionsweise und die unterschiedlichen Ausprägungen von Emissionshandelssystemen weltweit. Das EU ETS, das kalifornische Cap-and-Trade-Programm und der nationale Emissionshandel in China repräsentieren verschiedene Ansätze und Entwicklungsstadien und bieten umfassende Lernmöglichkeiten.

EU Emissionshandelssystem (EU ETS) Das EU ETS ist das größte und älteste internationale Emissionshandelssystem der Welt und ein Eckpfeiler der europäischen Klimapolitik (Klimko & Hasprová, 2025). Es wurde 2005 eingeführt und deckt energieintensive Industrien, den Stromsektor und seit 2012 auch den Luftverkehr innerhalb des Europäischen Wirtschaftsraums ab. Das System hat mehrere Phasen durchlaufen, die jeweils durch Anpassungen und Reformen gekennzeichnet waren, um auf Herausforderungen zu reagieren und die Ambition zu erhöhen.

In den frühen Phasen (2005-2007 und 2008-2012) litt das EU ETS unter einer Überallokation von Zertifikaten, was zu einem Preisverfall führte und die Anreize zur Emissionsreduktion minderte (Perino & Willner, 2016). Dies war primär auf eine zu großzügige Zuteilung von Zertifikaten durch die Mitgliedstaaten zurückzuführen, die die tatsächlichen Reduktionspotenziale und die Auswirkungen der Finanzkrise 2008 unterschätzten. Trotz dieser anfänglichen Schwierigkeiten zeigte das System, dass es grundsätzlich in der Lage ist, Emissionen zu reduzieren. Studien wie die von Klimko und Hasprová (2025) belegen, dass

das EU ETS einen signifikanten Einfluss auf die Reduktion von Treibhausgasemissionen in den abgedeckten Sektoren hatte, insbesondere in den späteren Phasen, als die Reformen griffen (Klimko & Hasprová, 2025).

Die dritte Phase (2013-2020) brachte wesentliche Reformen mit sich, darunter die Umstellung auf eine EU-weite Obergrenze und eine stärkere Zentralisierung der Zertifikatzuteilung, mit einem zunehmenden Anteil an Auktionierung gegenüber der kostenlosen Zuteilung. Die Einführung der Marktstabilitätsreserve (MSR) im Jahr 2019 war ein entscheidender Schritt zur Behebung des strukturellen Überschusses an Zertifikaten (Perino & Willner, 2016). Die MSR entnimmt automatisch Zertifikate aus dem Markt, wenn der Überschuss einen bestimmten Schwellenwert überschreitet, und führt sie einer Reserve zu, wodurch der Preis gestützt und die Anreize zur Emissionsreduktion verstärkt werden. Diese Maßnahme hat wesentlich zur Preisstabilisierung und zur Erhöhung der Ambition des Systems beigetragen.

Die vierte Phase (ab 2021) ist eng mit dem Europäischen Green Deal und den verschärften Klimazielen der EU verbunden. Das Reduktionsziel für die im EU ETS erfassten Emissionen wurde deutlich angehoben, und das System soll auf weitere Sektoren wie den Seeverkehr und den Gebäudesektor sowie den Straßenverkehr (über ein separates, aber verknüpftes System, ETS2) ausgeweitet werden. Dies unterstreicht die Rolle des EU ETS als zentrales Instrument zur Erreichung der Klimaneutralität bis 2050. Die Herausforderungen bleiben jedoch bestehen, insbesondere im Hinblick auf die Sicherstellung der Wettbewerbsfähigkeit europäischer Unternehmen (Carbon Leakage), die durch den Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) angegangen werden soll. Die Verknüpfung des EU ETS mit anderen Emissionshandelssystemen, wie dem der Schweiz (Bazelmans, 2008), zeigt das Potenzial für eine breitere Zusammenarbeit und eine effizientere globale Emissionsminderung.

Kalifornisches Cap-and-Trade-Programm Das kalifornische Cap-and-Trade-Programm, das 2013 unter der California Global Warming Solutions Act von 2006 (AB 32) begann, ist das größte subnationale System in Nordamerika. Es deckt etwa 85% der gesamten Treibhausgasemissionen des Bundesstaates ab, einschließlich Stromerzeugung, Industrie, Transport und Heizung. Ein charakteristisches Merkmal des kalifornischen Systems ist die Möglichkeit, einen Teil der Reduktionspflichten durch den Kauf von Offsets zu erfüllen, die aus Projekten außerhalb des regulierten Sektors stammen, beispielsweise aus Waldschutzprojekten (Skopek, 2010).

Das Design des kalifornischen Programms zeichnet sich durch eine jährliche Reduzierung der Obergrenze aus, um das Ziel zu erreichen, die Emissionen bis 2020 auf das Niveau von 1990 zu senken und bis 2030 um weitere 40% zu reduzieren. Ähnlich wie im EU ETS werden Zertifikate sowohl versteigert als auch kostenlos zugeteilt, wobei der Anteil der Auktionierung im Laufe der Zeit zunimmt. Das Programm hat nachweislich zu Emissionsreduktionen in Kalifornien beigetragen, obwohl die genaue kausale Wirkung aufgrund anderer parallel implementierter Klimaschutzmaßnahmen schwer zu isolieren ist. Die Einnahmen aus den Auktionen werden in den Greenhouse Gas Reduction Fund (GGRF) eingezahlt und zur Finanzierung von Investitionen in kohlenstoffarme Technologien und zur Unterstützung benachteiligter Gemeinden verwendet, was einen wichtigen Aspekt der Just Transition darstellt (Harris & McCarthy, 2023).

Ein Vergleich mit dem EU ETS zeigt einige Gemeinsamkeiten, wie die Cap-and-Trade-Struktur und die Anpassung der Obergrenze. Unterschiede liegen in der geografischen Reichweite (subnational vs. supranational), der Einbeziehung von Offsets und den Mechanismen zur Einnahmenverwendung. Kalifornien hat auch eine Preisuntergrenze (Price Floor) und eine Preisobergrenze (Price Ceiling) implementiert, um extreme Preisvolatilität zu mildern und Investitionssicherheit zu gewährleisten. Die Erfahrung Kaliforniens zeigt, dass ambitionierte Klimaziele auch auf subnationaler Ebene durch einen Emissionshandel erreicht werden können, insbesondere wenn er Teil eines umfassenden Klimaschutzbündels ist.

Chinesischer Nationaler Emissionshandel China, als weltweit größter Emittent von Treibhausgasen, hat mit der Einführung seines nationalen Emissionshandelssystems im Jahr 2021 einen entscheidenden Schritt in Richtung Klimaschutz unternommen. Vor dem nationalen System wurden ab 2013 sieben Pilot-Emissionshandelssysteme in verschiedenen Provinzen und Städten getestet, die wertvolle Erfahrungen für das Design des nationalen Systems lieferten (Zhang et al., 2024). Das chinesische ETS ist das größte der Welt und deckt in seiner ersten Phase den Stromerzeugungssektor ab, der für etwa 40% der nationalen CO2-Emissionen verantwortlich ist. Es wird erwartet, dass es in zukünftigen Phasen auf weitere energieintensive Sektoren wie Stahl, Zement und Petrochemie ausgeweitet wird.

Ein wesentliches Merkmal des chinesischen Systems ist sein intensitätsbasiertes Cap, im Gegensatz zu den absoluten Caps des EU ETS und Kaliforniens (Zhang et al., 2024). Dies bedeutet, dass die Obergrenze nicht in absoluten Emissionen, sondern in Emissionen pro Produktionseinheit (z.B. Tonnen CO2 pro Megawattstunde Strom) ausgedrückt wird. Dieser Ansatz soll die wirtschaftliche Entwicklung nicht behindern und gleichzeitig Anreize für Effizienzsteigerungen schaffen. Die Zertifikate werden hauptsächlich kostenlos zugeteilt, basierend auf historischen Emissionsintensitäten und Branchenbenchmarks (Chen, 2024).

Erste Analysen der Wirksamkeit des chinesischen ETS zeigen, dass es bereits zu Emissionsreduktionen beigetragen hat, indem es Unternehmen zu technologischen Verbesserungen und einer effizienteren Energieerzeugung anregt (Luo & Lim, 2024). Studien von Zhang et al. (2024) und Chen (2024) weisen darauf hin, dass das System Unternehmen dazu motiviert, ihre CO2-Emissionen zu senken und Investitionen in kohlenstoffarme Technologien zu tätigen (Zhang et al., 2024)(Chen, 2024). Allerdings steht das chinesische System noch am Anfang seiner Entwicklung und sieht sich Herausforderungen gegenüber, wie der Datenqualität, der Durchsetzung von Compliance-Regeln und der Notwendigkeit, eine robustere Preisbildung zu etablieren. Die Preisvolatilität ist im Vergleich zu etablierteren Systemen höher, was die Planungssicherheit für Unternehmen beeinträchtigen kann (Yu et al., 2022).

Die Erfahrungen aus diesen drei Fallstudien zeigen, dass Emissionshandelssysteme, obwohl sie auf gemeinsamen Prinzipien basieren, in ihrem Design, ihrer Umsetzung und ihren Ergebnissen erheblich variieren können. Erfolgreiche Systeme zeichnen sich durch ambitionierte Obergrenzen, transparente Marktmechanismen, Mechanismen zur Preisstabilisierung und eine kontinuierliche Anpassung an neue Gegebenheiten aus. Die Integration in eine breitere Klimapolitik und die Berücksichtigung von Gerechtigkeitsaspekten sind ebenfalls entscheidend für ihre langfristige Akzeptanz und Wirksamkeit.

Ausgewählte Kennzahlen der Emissionshandelssysteme

Die folgende Tabelle bietet eine vergleichende Übersicht über wichtige Kennzahlen und Designmerkmale der drei untersuchten Emissionshandelssysteme (EU ETS, Kalifornien, China).

Tabelle 3: Ausgewählte Kennzahlen der Emissionshandelssysteme (Stand 2023/2024)

| Merkmal | Kalifornien | | |
|------------------------------|---|------------------------------------|---|
| | EU ETS | Cap-and-Trade | China National ETS |
| Startjahr | 2005 | 2013 | 2021 (Pilotphase ab 2013) |
| Abgedeckte Sektoren | Energie, Industrie, Luftfahrt, Seeverkehr | Strom, Industrie, Verkehr, Heizung | Stromerzeugung (geplant: Stahl, Zement) |
| Anteil THG-Emissionen | ~40% der EU-Emissionen | ~85% der Staats-Emissionen | ~40% der nationalen CO2-Emissionen |
| Cap-Typ | Absolut (sinkend) | Absolut (sinkend) | Intensitätsbasiert (pro Produktionseinheit) |

| Kalifornien | | | |
|----------------------------|---|---|---|
| Merkmal | EU ETS | Cap-and-Trade | China National ETS |
| Zuteilung | Zunehmend Versteigerung, teilweise kostenlos | Versteigerung & kostenlose Zuteilung | Hauptsächlich kostenlos |
| Marktstabilität | Marktstabilitätsreserve (MSR) | Preisunter-/obergrenze (Price Floor/Ceiling) | Flexibilitätsmechanismen (noch in Entwicklung) |
| Linking | Mit Schweiz (seit 2020) | Mit Québec (seit 2014) | Keine internationalen Links |
| Carbon | Begrenzt, | Erlaubt (bis zu 8% der | Begrenzt, Pilotprojekte |
| Offsets | CDM-Nutzung beendet | Verpflichtung) | |
| Einnahmenverwendung | Große Teile der Einnahmen (Klimaschutz, Innovation) | Greenhouse Gas Reduction Fund (GGRF) | Lokale Regierungen (Klimaschutzprojekte) |
| Aktueller Preis | ~60-80 EUR/Tonne (variiert) | ~30-40 USD/Tonne (variert) | ~5-10 USD/Tonne (variert) |
| (CO2e) | | | |

Anmerkung: Die Daten sind Schätzungen und können je nach Berichtsquellen und Zeitpunkt variieren. „THG-Emissionen“ bezieht sich auf Treibhausgasemissionen.

Vergleich mit anderen Klimaschutzinstrumenten

Der Emissionshandel ist ein mächtiges Instrument, aber er ist nicht das einzige im Arsenal der Klimapolitik. Ein umfassender Vergleich mit anderen Klimaschutzinstrumenten ist unerlässlich, um die spezifischen Stärken und Schwächen des Emissionshandels zu verstehen und seine Rolle in einem integrierten Politikmix zu bewerten. Im Folgenden wer-

den CO₂-Steuern, regulatorische Maßnahmen (Command-and-Control), Subventionen und Förderprogramme sowie freiwillige Kohlenstoffmärkte und Offsets vergleichend betrachtet.

CO₂-Steuern CO₂-Steuern stellen eine direkte Bepreisung von Emissionen dar, indem sie eine Abgabe pro Tonne emittierten CO₂ festlegen (Conrad & Wang, 1995)(Winkler et al., 2010). Der Hauptunterschied zum Emissionshandel liegt darin, dass bei einer CO₂-Steuer der Preis für Emissionen festgelegt wird, während die resultierende Emissionsreduktion unsicher ist (abhängig von der Preiselastizität). Im Gegensatz dazu legt der Emissionshandel die Emissionsmenge fest (das Cap), während der Preis variabel ist.

Vorteile von CO₂-Steuern: * **Preissicherheit:** Unternehmen wissen genau, welche Kosten pro Tonne CO₂ anfallen, was die Planung und Investitionsentscheidungen erleichtern kann (Thamrin et al., 2025). * **Einnahmengenerierung:** CO₂-Steuern generieren direkte Einnahmen für den Staat, die für andere Klimaschutzmaßnahmen, zur Senkung anderer Steuern (Steuer-Switch) oder zur Entlastung der Bürger verwendet werden können (Chapatuka, 2025)(Thamrin et al., 2025). * **Einfachheit:** In der Theorie können CO₂-Steuern einfacher zu implementieren sein, da kein komplexer Markt für Zertifikate geschaffen und verwaltet werden muss.

Nachteile von CO₂-Steuern: * **Ungewisse Emissionsreduktion:** Die tatsächliche Emissionsreduktion ist nicht garantiert und hängt davon ab, wie empfindlich Unternehmen und Konsumenten auf Preisänderungen reagieren (Conrad & Wang, 1995).

* **Politische Akzeptanz:** Höhere Energiepreise durch Steuern können auf Widerstand in der Bevölkerung und der Industrie stoßen und als Belastung wahrgenommen werden, insbesondere wenn es keine Entlastungsmechanismen gibt (Harris & McCarthy, 2023). * **Gerechte Verteilung:** Ohne flankierende Maßnahmen können CO₂-Steuern sozial ungerecht wirken, da sie Haushalte mit geringem Einkommen überproportional belasten.

Hybridansätze, die Elemente von Emissionshandel und CO₂-Steuern kombinieren, werden ebenfalls diskutiert. Dies kann beispielsweise durch die Einführung von Preisunter-

oder -obergrenzen in einem ETS geschehen, um die Preissicherheit zu erhöhen und extreme Volatilität zu vermeiden.

Regulatorische Maßnahmen (Command-and-Control) Regulatorische Maßnahmen umfassen direkte Vorschriften und Standards, wie Emissionsgrenzwerte für Industrieanlagen, Effizienzstandards für Fahrzeuge oder Gebäude und Verbote bestimmter Technologien oder Stoffe.

Vorteile: * **Direkte Wirkung:** Regulatorische Maßnahmen können eine schnelle und direkte Wirkung auf Emissionen haben, da sie bestimmte Verhaltensweisen vorschreiben oder verbieten. * **Einfachere Implementierung:** In einigen Fällen können sie einfacher zu implementieren sein als marktwirtschaftliche Instrumente, insbesondere wenn es um spezifische technische Standards geht.

Nachteile: * **Geringere Kosteneffizienz:** Regulatorische Maßnahmen sind oft weniger kosteneffizient als marktwirtschaftliche Instrumente, da sie nicht die Möglichkeit bieten, Reduktionen dort durchzuführen, wo sie am billigsten sind. Sie behandeln alle Emittenten gleich, unabhängig von ihren individuellen Reduktionskosten. * **Innovationshemmnisse:** Sie können Innovationsanreize hemmen, da Unternehmen nur das Minimum tun, um die Vorschriften zu erfüllen, anstatt kontinuierlich nach kostengünstigeren Reduktionsmöglichkeiten zu suchen. * **Bürokratie:** Die Festlegung, Überwachung und Durchsetzung detaillierter Vorschriften kann einen erheblichen bürokratischen Aufwand verursachen.

Obwohl der Emissionshandel als übergeordnetes Instrument die Gesamtemissionen steuert, sind regulatorische Maßnahmen oft eine wichtige Ergänzung. Sie können beispielsweise dazu dienen, Mindeststandards zu setzen, die den CO2-Preis unterstützen oder in Sektoren greifen, die nicht vom Emissionshandel erfasst werden.

Subventionen und Förderprogramme Subventionen und Förderprogramme zielen darauf ab, Investitionen in kohlenstoffarme Technologien, erneuerbare Energien und Energieeff

fizienz zu beschleunigen, indem sie die Kosten für diese Technologien senken oder deren Rentabilität erhöhen (Cheng & Jiang, 2024).

Vorteile: * **Direkte Förderung:** Sie können gezielt bestimmte Technologien oder Sektoren fördern, die als besonders vielversprechend für die Dekarbonisierung gelten. * **Markteinführung:** Sie helfen, neue Technologien auf den Markt zu bringen und Skaleneffekte zu erzielen, die ihre Kosten senken. * **Politische Akzeptanz:** Förderprogramme sind oft politisch populärer als Steuern oder Abgaben.

Nachteile: * **Hohe Kosten:** Subventionen können erhebliche öffentliche Mittel binden und sind oft mit hohen Kosten für den Steuerzahler verbunden. * **Marktverzerrungen:** Sie können den Wettbewerb verzerren und zu einer ineffizienten Allokation von Ressourcen führen, wenn sie nicht sorgfältig konzipiert sind. * **Over-Subsidization:** Es besteht das Risiko, dass Technologien übermäßig subventioniert werden, die auch ohne Förderung marktfähig wären.

In einem umfassenden Klimaschutzmix können Subventionen und Förderprogramme den Emissionshandel ergänzen, indem sie die Entwicklung und den Einsatz emissionsarmer Technologien beschleunigen und so die Kosten der Emissionsreduktion im ETS senken.

Freiwillige Kohlenstoffmärkte und Offsets Freiwillige Kohlenstoffmärkte ermöglichen es Unternehmen oder Einzelpersonen, Emissionen durch den Kauf von Offsets zu kompensieren, die aus Projekten stammen, die Emissionen reduzieren oder entfernen (z.B. Aufforstung, erneuerbare Energien in Entwicklungsländern) (Macintosh et al., 2024)(Skopek, 2010). Diese Märkte existieren parallel zu den regulierten Compliance-Märkten.

Vorteile: * **Flexibilität:** Sie bieten eine flexible Möglichkeit für Akteure, über ihre gesetzlichen Verpflichtungen hinaus Klimaschutzbeiträge zu leisten. * **Finanzierung von Projekten:** Sie können die Finanzierung von Klimaschutzprojekten in Sektoren oder Regionen ermöglichen, die nicht von regulierten Systemen abgedeckt werden (Violet George, 2023).

Nachteile: * **Integrität und Additionality:** Die größte Herausforderung ist die Sicherstellung der Integrität von Offsets, insbesondere die “Additionalität” (würde das Projekt auch ohne den Verkauf von Offsets stattfinden?) und die Vermeidung von Doppelzählungen (Skopek, 2010). Viele Studien kritisieren die Qualität und Wirksamkeit von Offsets (Skopek, 2010). * **Greenwashing-Gefahr:** Unternehmen könnten Offsets nutzen, um ihr Image zu verbessern, ohne ihre eigenen Emissionen ausreichend zu reduzieren (“Greenwashing”). * **Geringere Skalierbarkeit:** Freiwillige Märkte können die erforderlichen Emissionsreduktionen nicht in dem Maße liefern wie regulierte Systeme.

Trotz der Herausforderungen können freiwillige Märkte eine Rolle spielen, insbesondere bei der Förderung innovativer Ansätze zur Kohlenstoffentfernung und bei der Mobilisierung privater Finanzmittel für den Klimaschutz (Violet George, 2023). Die Transparenz und Verlässlichkeit dieser Märkte muss jedoch durch robuste Standards und Verifizierungsprozesse gewährleistet werden (Merlo et al., 2025)(Jain et al., 2024).

Insgesamt zeigt sich, dass kein einzelnes Instrument den Klimawandel alleine bekämpfen kann. Ein wirksamer Klimaschutz erfordert einen kohärenten Politikmix, der die Stärken verschiedener Instrumente kombiniert und ihre Schwächen minimiert (Bertram et al., 2014). Der Emissionshandel kann dabei eine zentrale Rolle spielen, indem er einen effizienten Preis für CO₂ setzt und kontinuierliche Anreize für Innovation schafft, während andere Instrumente spezifische Marktversagen adressieren oder den sozialen Übergang unterstützen.

Empirische Belege für Klimaschutzwirkung

Die Frage nach der tatsächlichen Klimaschutzwirkung von Emissionshandelssystemen ist von größter Bedeutung für die Legitimität und Weiterentwicklung dieser Politik. Die empirische Evidenz wird durch eine Vielzahl von Studien, darunter Meta-Analysen, systematische Reviews und ökonometrische Analysen, untersucht, die versuchen, den kausalen Einfluss von CO₂-Preisen auf Emissionsreduktionen zu isolieren.

Meta-Analysen und systematische Reviews Systematische Reviews und Meta-Analysen bieten einen Überblick über die Forschungslage und synthetisieren die Ergebnisse zahlreicher Einzelstudien. Eine solche Meta-Analyse von Döbbeling-Hildebrandt et al. (2024) hat Ex-post-Evaluierungen von CO₂-Preisen untersucht und festgestellt, dass der Großteil der empirischen Studien eine signifikante und positive Wirkung auf die Emissionsreduktion feststellt (Döbbeling-Hildebrandt et al., 2024). Diese Studien verwenden eine Reihe von ökonometrischen Methoden, um den Effekt des CO₂-Preises von anderen Einflussfaktoren zu trennen. Die Ergebnisse sind jedoch nicht immer einheitlich und hängen stark vom spezifischen Design des Emissionshandelssystems, dem untersuchten Sektor, der geografischen Region und dem betrachteten Zeitraum ab (Döbbeling-Hildebrandt et al., 2024).

Die Konsistenz der Ergebnisse in diesen Übersichtsstudien unterstreicht die generelle Wirksamkeit des Instruments, weist aber auch auf die Notwendigkeit hin, die Kontextfaktoren genau zu analysieren. Beispielsweise können Systeme mit einem ambitionierteren Cap und einem robusteren Preisbildungsmechanismus tendenziell höhere Reduktionen erzielen. Ebenso ist die Integration des Emissionshandels in ein breiteres Politikpaket, das auch andere regulatorische oder fördernde Maßnahmen umfasst, oft effektiver als ein isolierter Ansatz (Bertram et al., 2014).

Statistische Methoden und Kausalitätsanalyse Um die kausale Wirkung eines Emissionshandelssystems auf Emissionen zu bestimmen, bedarf es ausgereifter statistischer Methoden. Einfache Korrelationen reichen nicht aus, da viele Faktoren gleichzeitig auf Emissionen einwirken. Häufig verwendete ökonometrische Ansätze umfassen:

- **Difference-in-Difference-Ansätze:** Diese Methode vergleicht die Emissionsentwicklung von Unternehmen oder Sektoren, die dem Emissionshandel unterliegen (Behandlungsgruppe), mit jenen, die nicht unterliegen (Kontrollgruppe), vor und nach der Einführung des Systems. Dies hilft, den spezifischen Effekt des ETS zu isolieren.

- **Paneldatenanalyse:** Durch die Analyse von Daten über mehrere Jahre und verschiedene Unternehmen/Regionen hinweg können zeitliche und räumliche Effekte berücksichtigt und der Einfluss des CO₂-Preises auf Emissionen besser geschätzt werden.
- **Instrumentalvariablen-Ansätze:** Diese Methode wird eingesetzt, um Endogenitätsprobleme zu lösen, d.h. wenn der CO₂-Preis selbst durch Emissionsentwicklungen beeinflusst wird.

Studien, die solche Methoden anwenden, haben beispielsweise für das EU ETS gezeigt, dass es zu signifikanten Emissionsreduktionen geführt hat (Klimko & Hasprová, 2025). Klimko und Hasprová (2025) fanden heraus, dass das EU ETS im Laufe der Zeit einen zunehmend wirksamen Einfluss auf die Reduktion von Treibhausgasemissionen hatte, insbesondere nachdem Reformen zur Stärkung des Preissignals implementiert wurden (Klimko & Hasprová, 2025). Ähnliche Studien für das chinesische ETS von Zhang et al. (2024) und Luo und Lim (2024) identifizieren ebenfalls einen Emissionsreduktionseffekt, wobei die genaue Höhe und die beeinflussenden Faktoren noch Gegenstand intensiver Forschung sind (Zhang et al., 2024)(Luo & Lim, 2024). Bello (2024) untersuchte die Rolle der CO₂-Bepreisung in kanadischen Provinzen und stellte einen positiven Zusammenhang mit Energieeffizienz und Emissionsminderung fest (Bello, 2024).

Sektorale Analysen und Herausforderungen Die empirischen Belege für die Klimaschutzwirkung variieren stark zwischen den Sektoren. Im Stromsektor, der oft zuerst in Emissionshandelssysteme integriert wird, sind die Reduktionspotenziale oft am deutlichsten, da der Wechsel von kohlenstoffintensiven zu kohlenstoffarmen Energiequellen relativ einfach ist (z.B. von Kohle zu Gas oder erneuerbaren Energien). Im Industriesektor, insbesondere in energieintensiven Branchen wie Zement oder Stahl, sind die Reduktionsmöglichkeiten oft komplexer und erfordern größere Investitionen in Prozesstechnologien.

Eine zentrale Herausforderung bei der Bewertung der empirischen Wirkung ist die Konstruktion eines glaubwürdigen kontrafaktischen Szenarios. Es ist schwierig zu bestimmen, wie sich die Emissionen ohne das Emissionshandelssystem entwickelt hätten, da viele andere Faktoren (z.B. Wirtschaftswachstum, technologische Fortschritte, andere Umweltauflagen) gleichzeitig wirken. Dies führt oft zu einer Bandbreite von Schätzungen in der Literatur und zu kritischen Diskussionen über die tatsächliche “Zusätzlichkeit” der durch den Emissionshandel erzielten Reduktionen (Sommer, 2015). Sommer (2015) kritisierte beispielsweise die Schwierigkeit, die tatsächliche Wirksamkeit von Klimaschutzmaßnahmen ex post zu beurteilen, da die Komplexität der Einflussfaktoren eine eindeutige Kausalzuschreibung erschwert (Sommer, 2015).

Indirekte Effekte und Kritikpunkte Neben den direkten Emissionsreduktionen können Emissionshandelssysteme auch indirekte Effekte haben:

- **Technologische Innovation:** Der CO₂-Preis schafft einen kontinuierlichen Anreiz für Unternehmen, in Forschung und Entwicklung emissionsarmer Technologien zu investieren, was langfristig zu tiefergehenden Dekarbonisierungslösungen führen kann (Cheng & Jiang, 2024).
- **Verhaltensänderungen:** Ein höherer CO₂-Preis kann auch zu Verhaltensänderungen bei Konsumenten führen, indem er energieeffizientere Produkte und Dienstleistungen attraktiver macht.
- **Greenwashing:** Ein Kritikpunkt, insbesondere im Zusammenhang mit Offsets und freiwilligen Märkten, ist die Gefahr des Greenwashings, bei dem Unternehmen durch den Kauf von Offsets ihr Image verbessern, ohne ihre eigenen Emissionen ausreichend zu reduzieren (Skopek, 2010). Die Integrität von Offsets ist ein wiederkehrendes Thema in der Debatte (Skopek, 2010).

Es gibt auch Kritikpunkte an der generellen Wirksamkeit von Emissionshandelssystemen. Einige argumentieren, dass die Preise oft zu niedrig waren, um wirklich transformative

Investitionen auszulösen, oder dass die Systeme zu komplex und anfällig für politische Interventionen sind. Die Überallokation von Zertifikaten in den frühen Phasen des EU ETS ist ein häufig zitiertes Beispiel (Perino & Willner, 2016). Doch mit den jüngsten Reformen und der Erhöhung der Ambition in vielen Systemen, wie dem EU ETS, scheint die Wirksamkeit zuzunehmen.

Zukünftige Forschungsperspektiven Zukünftige Forschung sollte sich auf die Verbesserung der Datenlage und die Entwicklung robusterer ökonometrischer Modelle konzentrieren, um die komplexen Interaktionen zwischen Emissionshandel, anderen Klimaschutzmaßnahmen und sozioökonomischen Faktoren besser zu verstehen. Die Analyse von Spillover-Effekten zwischen verschiedenen Märkten (z.B. CO2-Markt, Energiemarkt, Finanzmarkt) ist ebenfalls ein wichtiges Forschungsfeld (Wang et al., 2023)(Su et al., 2023). Darüber hinaus ist die Untersuchung der sozialen und distributiven Auswirkungen von CO2-Preisen entscheidend, um eine gerechte Energiewende zu gewährleisten (Harris & McCarthy, 2023). Die Rolle von Klimafinanzierung und die Mobilisierung von Ressourcen, insbesondere in Entwicklungsländern, sind ebenfalls zentrale Aspekte, die die Wirksamkeit globaler Klimaschutzbemühungen beeinflussen (Chapatuka, 2025).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die empirische Evidenz die Wirksamkeit von Emissionshandelssystemen bei der Reduktion von Treibhausgasemissionen grundsätzlich bestätigt, insbesondere wenn die Systeme gut gestaltet, ambitioniert und über die Zeit angepasst werden. Die Herausforderungen liegen in der genauen Kausalzuschreibung, der Vermeidung von Leakage und der Sicherstellung einer stabilen und ausreichend hohen CO2-Bepreisung, die transformative Veränderungen anstößt. Die kontinuierliche wissenschaftliche Begleitung und Evaluation ist daher unerlässlich, um die Effektivität dieser entscheidenden Klimaschutzinstrumente zu maximieren.

Szenarioprojektionen für CO₂-Reduktionen

Die folgende Tabelle zeigt beispielhafte Szenarioprojektionen für die CO₂-Reduktionen in einem fiktiven Sektor unter verschiedenen Kohlenstoffpreisszenarien und mit zusätzlichen politischen Maßnahmen. Diese Projektionen dienen dazu, das Potenzial und die Sensitivität gegenüber politischen Entscheidungen zu illustrieren.

Tabelle 4: Szenarioprojektionen für CO₂-Reduktionen in einem fiktiven Industriesektor (Millionen Tonnen CO₂e)

| Szenario | CO ₂ - | | Zusätzliche | | | Reduktionsrate (p.a.) |
|-------------------------------|-------------------------|-----------------|------------------------------|--------------------|--------------------------|--------------------------|
| | Ausgangsbasis (2020) | Preis (2030) | Maßnahmen (2030) | Prognose (2030) | Reduktion (vs. Basis) | |
| 1. | 100 | 0 | Keine | 95 | 5% | 0,5% |
| Baseline | | | EUR/Tonne | | | |
| 2. | 100 | 30 | Keine | 80 | 20% | 2,2% |
| Niedriger Preis | | | EUR/Tonne | | | |
| 3. Modifizierter Preis | 100 | 60 | Energieeffizienzstandards | 65 | 35% | 4,0% |
| | | | EUR/Tonne | | | |
| 4. Hoher Preis | 100 | 90 | Technologie-Förderung | 50 | 50% | 5,9% |
| | | | EUR/Tonne | | | |
| 5. Ambitioniert | 100 | 120 | Technologie + Infrastruktur | 35 | 65% | 8,0% |
| | | | EUR/Tonne | | | |
| 6. Netto-Null | 100 | >150 | Technologie + Sektorkopplung | 0 | 100% | 10,0% |
| | | | EUR/Tonne | CDR + | | |

Anmerkung: Die Zahlen sind fiktiv und dienen der Illustration. CDR = Carbon Dioxide Removal. Die Reduktionsrate p.a. ist eine durchschnittliche jährliche Rate. Die

“Zusätzlichen Maßnahmen” umfassen politische Instrumente, die über den reinen CO2-Preis hinausgehen und die Dekarbonisierung beschleunigen.

Diskussion

Die vorliegende Arbeit hat die Wirksamkeit und die Herausforderungen von CO2-Märkten als Instrument des Klimaschutzes untersucht. Die Ergebnisse dieser Analyse bieten eine Grundlage für eine umfassende Diskussion der Implikationen für die Klimapolitik, der inhärenten Grenzen und Potenziale dieser Mechanismen sowie konkreter Empfehlungen für Politik und Wirtschaft. Die Diskussion gliedert sich in die Erörterung der politischen Implikationen, die Identifizierung und Analyse von Grenzen und Herausforderungen, die Vorstellung von Verbesserungsvorschlägen, die Verortung von CO2-Märkten im globalen Kontext des Klimaschutzes und die Ableitung spezifischer Handlungsempfehlungen. Ziel ist es, die Erkenntnisse der Untersuchung in einen breiteren Rahmen zu stellen und ihre Relevanz für die Gestaltung zukünftiger Klimaschutzstrategien herauszuarbeiten.

Implikationen für die Klimapolitik

Die Analyse der CO2-Märkte zeigt, dass diese Instrumente ein zentrales Element moderner Klimapolitik darstellen und erhebliche Implikationen für die nationale und internationale Strategieentwicklung haben. Emissionshandelssysteme (EHS) wie das Europäische Emissionshandelssystem (EU-EHS) haben bewiesen, dass sie in der Lage sind, Treibhausgasemissionen effektiv zu reduzieren (Klimko & Hasprová, 2025)(Luo & Lim, 2024). Ihre Funktionsweise basiert auf dem ökonomischen Prinzip, Anreize zur Emissionsminderung zu schaffen, indem ein Preis für CO2-Emissionen festgelegt wird (Winkler et al., 2010). Dies führt dazu, dass Unternehmen interne Kosten für ihre Emissionen berücksichtigen und somit Investitionen in emissionsärmere Technologien und Prozesse fördern (Chen, 2024). Die Fähigkeit von CO2-Märkten, Emissionen kosten-effizient zu reduzieren, ist eine ihrer größten

Stärken, da sie es der Wirtschaft ermöglicht, die günstigsten Minderungsoptionen zu identifizieren und umzusetzen (Conrad & Wang, 1995).

Eine wesentliche Implikation ist die Notwendigkeit einer klaren und langfristigen politischen Rahmensetzung. Die Unsicherheit über zukünftige CO₂-Preise und politische Entscheidungen kann die Investitionsbereitschaft von Unternehmen in emissionsmindernde Technologien hemmen (Wang et al., 2023)(Liang et al., 2024). Eine stabile und vorhersehbare Politik, die einen klaren Reduktionspfad und eine robuste Preisgestaltung signalisiert, ist daher entscheidend für den Erfolg von CO₂-Märkten. Dies beinhaltet auch die Gestaltung von Mechanismen zur Marktstabilität, wie die Marktstabilitätsreserve im EU-EHS, die darauf abzielt, Überschüsse an Emissionszertifikaten abzubauen und Preissignale zu stärken (Perino & Willner, 2016). Ohne solche Mechanismen besteht die Gefahr von Preisvolatilität, die sowohl die Planungssicherheit für Unternehmen als auch die politische Akzeptanz des Instruments untergraben kann (Yu et al., 2022).

Darüber hinaus haben CO₂-Märkte weitreichende Auswirkungen auf die Wettbewerbsfähigkeit von Industrien. Unternehmen in Ländern mit strengen Emissionshandelssystemen könnten Kostennachteile gegenüber Wettbewerbern in Regionen ohne vergleichbare CO₂-Bepreisung erleiden, was zum Phänomen der Kohlenstoffverlagerung (Carbon Leakage) führen kann (Bär, 2021). Politische Maßnahmen wie kostenlose Zuteilung von Zertifikaten für bestimmte Sektoren oder die Einführung von Grenzausgleichsmechanismen (Carbon Border Adjustment Mechanisms, CBAM) sind daher notwendig, um diese Risiken zu mindern und gleiche Wettbewerbsbedingungen zu gewährleisten. Die Implementierung solcher Schutzmaßnahmen ist jedoch komplex und erfordert eine sorgfältige Abwägung zwischen Umweltschutzambitionen und wirtschaftlichen Interessen. Die Erfahrung des EU-EHS zeigt, dass eine kontinuierliche Anpassung und Verfeinerung der Zuteilungsregeln erforderlich ist, um sowohl die Effektivität als auch die Akzeptanz des Systems zu gewährleisten.

Die Integration von CO₂-Märkten in ein umfassenderes klimapolitisches Instrumentarium ist eine weitere wichtige Implikation. Emissionshandelssysteme sind kein Allheilmittel

und sollten durch komplementäre Maßnahmen ergänzt werden. Dazu gehören Investitionen in Forschung und Entwicklung für grüne Technologien, Förderprogramme für erneuerbare Energien und Energieeffizienz sowie ordnungsrechtliche Vorschriften (Bertram et al., 2014). Die Kombination von preisbasierten Instrumenten wie dem EHS mit technologieorientierten Politiken kann Synergien schaffen und den Übergang zu einer kohlenstoffarmen Wirtschaft beschleunigen (Cheng & Jiang, 2024). Beispielsweise kann ein stabiler CO₂-Preis die Wirtschaftlichkeit von erneuerbaren Energien verbessern, während Subventionen für deren Ausbau die Markteinführung beschleunigen. Die Herausforderung besteht darin, Überschneidungen und widersprüchliche Anreize zwischen verschiedenen Politikinstrumenten zu vermeiden (Stopora, 2002).

Ein entscheidender Aspekt ist auch die soziale Dimension der CO₂-Bepreisung. Die Einführung oder Verschärfung von CO₂-Preisen kann zu erhöhten Kosten für Haushalte und Unternehmen führen, was insbesondere einkommensschwächere Bevölkerungsgruppen unverhältnismäßig belasten kann (Bae, 2018). Eine gerechte Transformation (“Just Transition”) erfordert daher begleitende sozialpolitische Maßnahmen, wie die Rückverteilung von Einnahmen aus dem Emissionshandel an Haushalte oder die Unterstützung von strukturellen Anpassungen in betroffenen Regionen und Sektoren (Harris & McCarthy, 2023). Ohne eine solche soziale Flankierung kann die Akzeptanz von CO₂-Märkten in der Bevölkerung und Wirtschaft leiden, was politische Rückschläge zur Folge haben könnte. Die Diskussion über die Verteilungsgerechtigkeit der Lasten des Klimaschutzes ist daher untrennbar mit der Gestaltung von CO₂-Märkten verbunden.

Die Rolle von CO₂-Märkten in der internationalen Klimapolitik ist ebenfalls von großer Bedeutung. Die Verknüpfung nationaler und regionaler Emissionshandelssysteme kann zu einer effizienteren globalen Emissionsminderung führen, indem sie die Arbitrage von CO₂-Preisen ermöglicht und die Kosten des Klimaschutzes senkt (Bazelmans, 2008). Dies erfordert jedoch eine Harmonisierung von Regeln und Standards, um die Integrität der verbundenen Märkte zu gewährleisten (Yliheljo, 2021). Die Erfahrungen aus der Verknüp-

fung des EU-EHS mit anderen Systemen zeigen sowohl die Potenziale als auch die Komplexität solcher Unterfangen. Trotz der Herausforderungen bleibt die Verknüpfung ein vielversprechender Weg zur Schaffung eines globalen Kohlenstoffmarktes, der eine effiziente Erreichung der Pariser Klimaziele unterstützen könnte (Asadnabizadeh & Moe, 2024).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass CO2-Märkte ein mächtiges Instrument zur Lenkung von Emissionen darstellen, deren volle Wirksamkeit jedoch von einer intelligenten politischen Rahmensetzung abhängt. Diese muss langfristige Stabilität gewährleisten, Wettbewerbsnachteile ausgleichen, komplementäre Politiken integrieren und soziale Gerechtigkeit berücksichtigen. Nur so können CO2-Märkte ihr volles Potenzial entfalten und einen nachhaltigen Beitrag zur Dekarbonisierung leisten.

Grenzen und Herausforderungen des Emissionshandels

Trotz des nachgewiesenen Potenzials von Emissionshandelssystemen (EHS) zur Emissionsminderung sind sie mit einer Reihe von Grenzen und Herausforderungen konfrontiert, die ihre Effektivität und Akzeptanz beeinträchtigen können. Eine der größten Herausforderungen ist die **Volatilität des CO2-Preises** (Yu et al., 2022). Schwankende Preise, die durch wirtschaftliche Rezessionen, unvorhergesehene politische Entscheidungen oder externe Schocks (wie die COVID-19-Pandemie) verursacht werden, können die Planungs- und Investitionssicherheit für Unternehmen erheblich mindern (Houballah et al., 2024)(Liang et al., 2024). Ein zu niedriger CO2-Preis liefert keine ausreichenden Anreize für Investitionen in emissionsmindernde Technologien, während extrem hohe Preise die Wettbewerbsfähigkeit von Industrien gefährden und zu politischem Widerstand führen können. Die Schaffung von Marktstabilitätsmechanismen, wie der Marktstabilitätsreserve im EU-EHS, ist ein Versuch, dieser Volatilität entgegenzuwirken, doch die optimale Ausgestaltung und ihr langfristiger Erfolg bleiben Gegenstand der Debatte (Perino & Willner, 2016).

Eine weitere zentrale Grenze ist das **Risiko der Kohlenstoffverlagerung (Carbon Leakage)**. Wenn Unternehmen in einem EHS-Gebiet strengen CO2-Preisen ausgesetzt sind,

während Wettbewerber in anderen Regionen dies nicht sind, könnten sie ihre Produktion in Länder mit weniger strengen Klimaschutzauflagen verlagern (Sayer, 2015). Dies würde nicht nur die heimische Wirtschaft schwächen, sondern auch den globalen Emissionsminderungseffekt zunichten machen, da die Emissionen lediglich geografisch verlagert werden. Maßnahmen wie die kostenlose Zuteilung von Zertifikaten oder Grenzausgleichsmechanismen (CBAM) sind notwendig, um dieses Risiko zu mindern, bringen jedoch eigene administrative und politische Komplexitäten mit sich. Die genaue Bestimmung, welche Sektoren tatsächlich von Carbon Leakage bedroht sind, und die faire Ausgestaltung von Schutzmaßnahmen ist eine fortwährende Herausforderung.

Die **Abgrenzung des Geltungsbereichs (Scope)** von EHS ist ebenfalls eine kritische Grenze. Viele Systeme konzentrieren sich zunächst auf energieintensive Industrien und den Energiesektor, lassen aber andere wichtige Emittenten wie den Verkehr, die Landwirtschaft oder Gebäude unberücksichtigt (Ekardt & Hennig, 2011). Eine Ausweitung des Geltungsbereichs auf diese Sektoren ist notwendig, um umfassende Emissionsminderungen zu erzielen, stößt jedoch auf erheblichen Widerstand und praktische Schwierigkeiten bei der Messung, Berichterstattung und Verifizierung von Emissionen. Insbesondere die Integration von Landnutzung und Landwirtschaft in EHS ist komplex, da biologische Prozesse und die räumliche Verteilung der Emissionen besondere Herausforderungen darstellen (Tyagi & Haritash, 2024)(Macintosh et al., 2024). Die erfolgreiche Einbeziehung dieser Sektoren erfordert innovative Ansätze und angepasste Monitoring-Methoden.

Verteilungseffekte und soziale Gerechtigkeit stellen eine erhebliche Herausforderung dar (Bae, 2018). Die Kosten der CO₂-Bepreisung können über höhere Preise für Energie und Produkte auf Verbraucher abgewälzt werden, was einkommensschwächere Haushalte überproportional belastet. Dies kann zu sozialer Ungleichheit führen und die politische Akzeptanz von EHS untergraben, wie die “Gelbwesten”-Proteste in Frankreich gezeigt haben, die ursprünglich durch eine Erhöhung der Kraftstoffsteuern ausgelöst wurden (spiegel.de, 2025). Die Entwicklung von fairen Kompensationsmechanismen, wie der Rück-

Verteilung von EHS-Einnahmen oder gezielten Förderprogrammen, ist entscheidend, um die soziale Gerechtigkeit zu gewährleisten und einen “Just Transition” zu ermöglichen (Harris & McCarthy, 2023). Ohne solche Maßnahmen besteht die Gefahr, dass die Klimapolitik als ungerecht wahrgenommen wird und ihren Rückhalt in der Bevölkerung verliert.

Die **Qualität und Integrität von Offsets und Zertifikaten** ist eine weitere Schwachstelle, insbesondere in freiwilligen Kohlenstoffmärkten. Die Wirksamkeit von Offsets hängt davon ab, ob sie zusätzliche, dauerhafte und überprüfbare Emissionsminderungen oder -entnahmen repräsentieren (Skopek, 2010). Es gibt jedoch Bedenken hinsichtlich der Glaubwürdigkeit vieler Projekte, insbesondere im Bereich der Landnutzung und Forstwirtschaft, wo die Additionalität, Permanenz und das Risiko von Leckagen schwer zu garantieren sind (Macintosh et al., 2024). Mangelnde Transparenz und die Schwierigkeit der Verifizierung können das Vertrauen in den Markt untergraben und zu “Greenwashing”-Vorwürfen führen. Die Etablierung robuster Standards und unabhängiger Verifizierungsmechanismen ist unerlässlich, um die Integrität dieser Märkte zu sichern.

Schließlich ist die **Komplexität der Governance und Administration** von EHS eine Herausforderung (Herman, 2024). Die Gestaltung, Implementierung und Überwachung eines effektiven Emissionshandelssystems erfordert umfangreiches Fachwissen, robuste institutionelle Kapazitäten und die Fähigkeit zur Anpassung an sich ändernde Bedingungen. Dies gilt insbesondere für die Verknüpfung verschiedener EHS, die eine Harmonisierung von Regeln, Monitoring- und Berichterstattungssystemen erfordert (Bazelmans, 2008). Die Koordination zwischen verschiedenen nationalen und internationalen Akteuren ist anspruchsvoll und kann durch politische Meinungsverschiedenheiten oder unterschiedliche Ambitionsniveaus erschwert werden (Yliheljo, 2021).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass CO2-Märkte zwar ein mächtiges Instrument sind, ihre volle Wirkung jedoch durch inhärente Grenzen und eine Reihe komplexer Herausforderungen eingeschränkt wird. Die Bewältigung dieser Probleme erfordert

eine kontinuierliche Weiterentwicklung der Politik, robuste Governance-Strukturen und eine sorgfältige Abwägung sozialer und wirtschaftlicher Implikationen.

Verbesserungsvorschläge für CO₂-Märkte

Um die Effektivität und Akzeptanz von CO₂-Märkten zu steigern und ihre bestehenden Grenzen zu überwinden, sind eine Reihe von Verbesserungsvorschlägen denkbar, die sowohl die strukturelle Gestaltung als auch die operative Umsetzung betreffen.

Ein zentraler Ansatzpunkt ist die **Stärkung der Marktstabilität und Preissig-
nale**. Die Volatilität des CO₂-Preises ist eine wiederkehrende Herausforderung (Yu et al., 2022). Mechanismen wie die Marktstabilitätsreserve (MSR) im EU-EHS haben das Potenzial, Überschüsse abzubauen und den Preis zu stabilisieren (Perino & Willner, 2016). Ihre Wirksamkeit könnte jedoch durch eine dynamischere Anpassung der Parameter oder die Einführung von Preisbändern (Price Collars) weiter verbessert werden, die einen Mindest- und Höchstpreis für Zertifikate festlegen. Ein Mindestpreis würde Investitionssicherheit bieten und einen dauerhaften Anreiz zur Emissionsminderung schaffen, während ein Höchstpreis extreme Preisschocks abfedern könnte, die die Wettbewerbsfähigkeit gefährden. Solche Preisbänder müssten jedoch sorgfältig kalibriert werden, um die Marktdynamik nicht zu stark zu beeinträchtigen.

Eine **Ausweitung des Geltungsbereichs** auf weitere Sektoren ist entscheidend, um das volle Minderungs-potenzial auszuschöpfen. Der Verkehr, der Gebäudesektor und die Landwirtschaft sind erhebliche Emittenten, die in vielen EHS noch nicht oder nur unzureichend erfasst sind (Ekardt & Hennig, 2011). Die Integration dieser Sektoren erfordert jedoch maßgeschneiderte Ansätze, da die Emissionsquellen diverser und die Messung komplexer sind. Für den Verkehrssektor könnten separate EHS oder die Integration in bestehende Systeme durch die Bepreisung von Kraftstoffen auf Großhandelsebene in Betracht gezogen werden. Im Gebäudesektor könnte ein EHS für Brennstoffe oder die Anrechnung von Energieeffizienzmaßnahmen über zertifizierte Einsparungen erfolgen. Die Landwirtschaft stellt aufgrund ihrer

biologischen Prozesse und dezentralen Strukturen eine besondere Herausforderung dar, könnte aber durch die Förderung von Kohlenstoffsenken in Böden und Wäldern über zertifizierte Entnahmen eingebunden werden (Tyagi & Haritash, 2024)(Macintosh et al., 2024).

Um dem Risiko der **Kohlenstoffverlagerung** zu begegnen, sind **robuste Grenzausgleichsmechanismen (CBAM)** von entscheidender Bedeutung. Diese Mechanismen stellen sicher, dass Importe aus Ländern ohne vergleichbare CO₂-Bepreisung einen äquivalenten Preis für ihre Emissionen zahlen, wodurch gleiche Wettbewerbsbedingungen geschaffen und Anreize zur Verlagerung der Produktion entfallen (taxation-customs.ec.europa.eu, 2025). Die Implementierung von CBAM ist jedoch administrativ aufwendig und erfordert eine präzise Messung der Emissionen in den importierten Produkten sowie die Einhaltung internationaler Handelsregeln. Eine sorgfältige Gestaltung ist notwendig, um Handelskonflikte zu vermeiden.

Die **Verbesserung der Transparenz und Integrität** von Kohlenstoffmärkten, insbesondere im Bereich der Offsets und freiwilligen Märkte, ist ein weiterer wichtiger Aspekt. Die Einführung strengerer Standards für die Zertifizierung von Emissionsminderungsprojekten, eine verbesserte Verifizierung durch unabhängige Dritte und die Nutzung digitaler Technologien wie Blockchain können die Glaubwürdigkeit und Nachvollziehbarkeit von Zertifikaten erheblich erhöhen (Merlo et al., 2025)(Jain et al., 2024). Blockchain-Technologie könnte beispielsweise eine unveränderliche Aufzeichnung von Emissionsrechten und Transaktionen ermöglichen, was Betrug vorbeugt und die Doppelzählung von Zertifikaten verhindert. Dies würde das Vertrauen der Marktteilnehmer stärken und die Akzeptanz von Offsets als legitimes Instrument fördern.

Internationale Kooperation und Verknüpfung von EHS bieten ein enormes Potenzial zur Steigerung der Kosteneffizienz und zur Schaffung eines globalen Kohlenstoffpreises (Bazelmans, 2008)(Asadnabizadeh & Moe, 2024). Die Harmonisierung von Regeln, Monitoring- und Berichterstattungssystemen sowie die Anerkennung von Zertifikaten über Grenzen hinweg sind jedoch Voraussetzung für eine erfolgreiche Verknüpfung (Yliheljo, 2021).

Eine schrittweise Annäherung, beginnend mit bilateralen Verknüpfungen und der Entwicklung gemeinsamer Standards, könnte den Weg für einen integrierteren globalen Kohlenstoffmarkt ebnen. Dies würde nicht nur die Effizienz der Emissionsminderung steigern, sondern auch die politische Zusammenarbeit im Klimaschutz fördern.

Schließlich sind **soziale Ausgleichsmechanismen** unerlässlich, um die Akzeptanz von CO2-Märkten in der Bevölkerung zu sichern (Harris & McCarthy, 2023). Einnahmen aus dem Emissionshandel könnten gezielt zur Unterstützung einkommensschwacher Haushalte, zur Förderung von Energieeffizienzmaßnahmen oder zur Finanzierung von Innovationen in grünen Technologien verwendet werden. Ein “Klimageld” oder die Senkung anderer Steuern könnten die Belastung durch höhere CO2-Preise abfedern und die soziale Gerechtigkeit stärken (background.tagesspiegel.de, 2025). Die Kommunikation dieser Ausgleichsmaßnahmen ist ebenso wichtig wie ihre Implementierung, um die Vorteile der CO2-Bepreisung für die Gesellschaft transparent zu machen.

Diese Verbesserungsvorschläge zeigen, dass CO2-Märkte keine statischen Instrumente sind, sondern sich kontinuierlich weiterentwickeln müssen, um ihre Rolle im Klimaschutz effektiv wahrnehmen zu können. Durch eine kluge Kombination aus Marktmechanismen, technologischer Innovation und sozialpolitischen Flankierungsmaßnahmen können sie zu einem noch mächtigeren Werkzeug im Kampf gegen den Klimawandel werden.

Rolle im globalen Klimaschutz

Die Rolle von CO2-Märkten im globalen Klimaschutz ist vielschichtig und von entscheidender Bedeutung für die Erreichung der im Pariser Abkommen festgelegten Ziele, insbesondere des 1,5-Grad-Ziels. Emissionshandelssysteme (EHS) und andere Formen der CO2-Bepreisung sind als flexible und kosteneffiziente Instrumente anerkannt, die Länder dabei unterstützen können, ihre national festgelegten Beiträge (NDCs) zu erfüllen (Digitemie & Ekemezie, 2024)(Emeka-Okoli et al., 2024). Durch die Schaffung eines Preises für CO2-Emissionen wird ein ökonomischer Anreiz zur Emissionsminderung gesetzt, der es

der Wirtschaft ermöglicht, die günstigsten Reduktionsmöglichkeiten zu identifizieren und umzusetzen (Winkler et al., 2010). Dies ist besonders relevant in einer globalen Landschaft, in der eine breite Palette von Reduktionskosten über verschiedene Regionen und Sektoren hinweg besteht.

Ein zentraler Aspekt ist die **Förderung der Kosteneffizienz auf globaler Ebene**. Wenn Emissionsreduktionen dort stattfinden, wo sie am günstigsten sind, kann der globale Klimaschutz mit geringeren Gesamtkosten erreicht werden (Kreis-Hoyer, 2000). Dies ist das grundlegende Argument für die Verknüpfung nationaler und regionaler EHS oder die Schaffung internationaler Kohlenstoffmärkte unter Artikel 6 des Pariser Abkommens (Bazelmans, 2008)(Asadnabizadeh & Moe, 2024). Durch solche Verknüpfungen können Länder, die ihre NDCs kostengünstig übertreffen, Zertifikate an Länder verkaufen, die ihre Ziele andernfalls nur zu höheren Kosten erreichen könnten. Dies fördert nicht nur die Effizienz, sondern kann auch die Ambitionen im Klimaschutz steigern, da die Lasten gerechter verteilt werden und die Erreichung der Ziele erleichtert wird. Die Etablierung robuster Regeln für die Vermeidung von Doppelzählungen und die Sicherstellung der Umweltintegrität ist dabei von größter Wichtigkeit (Yliheljo, 2021).

CO2-Märkte können auch eine **Katalysatorfunktion für grüne Innovationen und Technologietransfer** ausüben. Ein stabiler und ausreichend hoher CO2-Preis signalisiert Investitionsbedarf in kohlenstoffarme Technologien und Prozesse (Cheng & Jiang, 2024). Dies kann die Entwicklung und Skalierung von erneuerbaren Energien, Energieeffizienztechnologien und CO2-Abscheidungs- und -Speicherlösungen (CCS) beschleunigen. Insbesondere in Entwicklungsländern, die oft über geringere technologische Kapazitäten verfügen, kann der Zugang zu internationalen Kohlenstoffmärkten den Transfer von sauberer Technologie und finanziellen Ressourcen erleichtern, um eine kohlenstoffarme Entwicklung zu fördern (Chapatuka, 2025). Dies trägt dazu bei, den “Klimaschutz-Gap” zu schließen, d.h. die Lücke zwischen den aktuellen Klimaschutzmaßnahmen und dem, was notwendig ist, um die globalen Ziele zu erreichen (Bertram et al., 2014).

Die Harmonisierung und Standardisierung von CO2-Märkten spielt eine entscheidende Rolle bei der Schaffung eines kohärenten globalen Rahmens. Während viele Länder und Regionen eigene EHS entwickeln – wie das EU-EHS, das Emissionshandelssystem in China (Zhang et al., 2024) oder regionale Systeme in Nordamerika – besteht die Herausforderung darin, diese Systeme miteinander kompatibel zu machen. Eine gewisse Angleichung von Regeln, Monitoring-, Berichterstattungs- und Verifizierungsprotokollen (MRV) ist notwendig, um die Integrität grenzüberschreitender Transaktionen zu gewährleisten und das Vertrauen in die Märkte zu stärken. Dies ist ein langfristiger Prozess, der intensive internationale Zusammenarbeit und den politischen Willen zur Konvergenz erfordert.

Darüber hinaus können CO2-Märkte dazu beitragen, **Privatkapital für den Klimaschutz zu mobilisieren**. Anstatt allein auf öffentliche Mittel angewiesen zu sein, schaffen EHS Anreize für private Investitionen in Emissionsminderungen. Dies ist besonders relevant für Projekte zur CO2-Entnahme (Carbon Removals), die eine entscheidende Rolle bei der Erreichung von Netto-Null-Zielen spielen werden (Violet George, 2023). Projekte in der Landnutzung, Aufforstung und der Entwicklung neuer Technologien zur Kohlenstoffentnahme können durch den Verkauf von Zertifikaten finanziert werden (Macintosh et al., 2024). Die Entwicklung robuster und transparenter freiwilliger Kohlenstoffmärkte, die hohe Qualitätsstandards erfüllen, ist hierbei essenziell, um “Greenwashing” zu vermeiden und die Glaubwürdigkeit dieser Investitionen sicherzustellen (Skopek, 2010).

Schließlich tragen CO2-Märkte zur **Stärkung der globalen Klimagouvernanz** bei. Sie bieten einen Rahmen für die kontinuierliche Bewertung und Anpassung von Klimaschutzmaßnahmen, da die Preise die Knappheit von Emissionsrechten widerspiegeln und somit einen Indikator für den Fortschritt bei der Dekarbonisierung darstellen (Xiong, 2024). Die Erfahrung mit EHS, wie dem EU-EHS, liefert wertvolle Erkenntnisse für andere Länder, die ähnliche Systeme einführen möchten, und fördert den Wissensaustausch über Best Practices und Herausforderungen (Klimko & Hasprová, 2025). Die Entwicklung eines globalen Kohlenstoffpreises, auch wenn er durch die Verknüpfung regionaler Märkte entsteht, wäre

ein starkes Signal für die globale Wirtschaft, dass der Übergang zu einer kohlenstoffarmen Zukunft unumkehrbar ist.

Die Rolle von CO2-Märkten im globalen Klimaschutz ist somit weit mehr als nur ein Instrument zur Emissionsminderung; sie sind ein Treiber für Effizienz, Innovation, Kapitalmobilisierung und internationale Zusammenarbeit, die alle für die Bewältigung der Klimakrise unerlässlich sind.

Empfehlungen für Politik und Wirtschaft

Aus den erörterten Implikationen, Grenzen und Verbesserungspotenzialen von CO2-Märkten lassen sich konkrete Empfehlungen für Politik und Wirtschaft ableiten, die darauf abzielen, die Wirksamkeit dieser Instrumente im Klimaschutz zu maximieren.

Für die Politik:

1. **Langfristige und stabile Rahmensetzung:** Die Politik sollte einen klaren, ambitionierten und langfristigen Reduktionspfad für Emissionen festlegen, der Planungssicherheit für Investitionen in kohlenstoffarme Technologien bietet (Wang et al., 2023)(Liang et al., 2024). Dies beinhaltet die regelmäßige Überprüfung und gegebenenfalls Anpassung der Obergrenzen (Caps) von EHS, um die Ziele des Pariser Abkommens zu erreichen.
2. **Stärkung der Marktstabilität:** Implementierung und kontinuierliche Verbesserung von Marktstabilitätsmechanismen, wie der Marktstabilitätsreserve, sind unerlässlich, um Preisvolatilität zu reduzieren (Perino & Willner, 2016). Die Einführung von Preisbändern (Mindest- und Höchstpreisen) sollte ernsthaft geprüft werden, um extreme Preisschwankungen abzufedern und Investitionssicherheit zu erhöhen.
3. **Ausweitung des Geltungsbereichs:** Eine schrittweise, aber konsequente Ausweitung von CO2-Märkten auf bisher nicht oder unzureichend erfasste Sektoren wie Verkehr, Gebäude und Landwirtschaft ist notwendig (Ekardt & Hennig, 2011).

Dabei sind sektorspezifische Besonderheiten und die Notwendigkeit maßgeschneiderter Monitoring- und Verifizierungssysteme zu berücksichtigen.

4. **Effektive Schutzmaßnahmen gegen Carbon Leakage:** Die Entwicklung und Implementierung robuster Grenzausgleichsmechanismen (CBAM) ist entscheidend, um die Wettbewerbsfähigkeit heimischer Industrien zu schützen und die Verlagerung von Emissionen zu verhindern (Kriebel et al., 2024). Eine internationale Koordination bei der Gestaltung solcher Mechanismen ist wünschenswert.
5. **Soziale Flankierung und gerechte Transformation:** Einnahmen aus der CO₂-Bepreisung sollten gezielt zur Unterstützung einkommensschwacher Haushalte, zur Förderung von Energieeffizienz und zur Finanzierung des Strukturwandels in betroffenen Regionen verwendet werden (Harris & McCarthy, 2023). Die Einführung eines Klimageldes oder vergleichbarer Rückverteilungsmechanismen kann die soziale Akzeptanz von CO₂-Preisen erheblich steigern.
6. **Förderung internationaler Kooperation und Verknüpfung:** Die Politik sollte sich aktiv für die Harmonisierung von EHS-Regeln und die Verknüpfung nationaler und regionaler Systeme einsetzen (Bazelmans, 2008). Dies erleichtert den kosteneffizienten globalen Klimaschutz und fördert den Technologietransfer, insbesondere unter Artikel 6 des Pariser Abkommens (Asadnabizadeh & Moe, 2024).
7. **Komplementäre Politiken integrieren:** CO₂-Märkte sollten als Teil eines umfassenderen Instrumentenmixes betrachtet werden. Investitionen in Forschung und Entwicklung, Förderprogramme für erneuerbare Energien und Energieeffizienz sowie ordnungsrechtliche Standards ergänzen die preisbasierten Anreize und beschleunigen den Übergang (Bertram et al., 2014).

Für die Wirtschaft:

1. **Proaktive Dekarbonisierungsstrategien entwickeln:** Unternehmen sollten CO₂-Preise nicht nur als Kostenfaktor, sondern als Anreiz für Innovation und Wettbewerbsvorteile verstehen. Die Entwicklung und Umsetzung von Dekarbonisierungsstrate-

gien, die über die gesetzlichen Mindestanforderungen hinausgehen, kann langfristig Kosten senken und die Resilienz gegenüber zukünftigen Klimaschutzmaßnahmen erhöhen (Chen, 2024).

2. **Investitionen in kohlenstoffarme Technologien:** Ein stabiler CO2-Preis schafft Anreize für Investitionen in Energieeffizienz, erneuerbare Energien und andere emissionsmindernde Technologien (Cheng & Jiang, 2024). Unternehmen sollten diese Investitionen als strategische Chance zur Modernisierung und zur Sicherung ihrer Zukunftsfähigkeit begreifen.
3. **Transparenz und Berichterstattung:** Eine transparente Berichterstattung über Emissionen und Minderungsanstrengungen ist nicht nur gesetzlich vorgeschrieben, sondern auch entscheidend für das Vertrauen von Investoren, Kunden und der Öffentlichkeit. Die Nutzung digitaler Tools kann hierbei unterstützen.
4. **Engagement in freiwilligen Kohlenstoffmärkten mit Integrität:** Unternehmen, die Offsets nutzen, sollten höchste Qualitätsstandards an die Projekte anlegen, um die Glaubwürdigkeit ihrer Klimaschutzbemühungen zu gewährleisten (Skopek, 2010). Die Unterstützung von Projekten, die nachweislich zusätzliche und dauerhafte Emissionsminderungen erzielen, ist hierbei entscheidend (Macintosh et al., 2024).
5. **Zusammenarbeit mit der Politik:** Die Wirtschaft sollte den Dialog mit politischen Entscheidungsträgern suchen, um praktikable und effektive Lösungen für die Weiterentwicklung von CO2-Märkten zu finden. Eine konstruktive Zusammenarbeit kann dazu beitragen, die Herausforderungen des Strukturwandels gemeinsam zu meistern und eine gerechte Transformation zu gestalten (Harris & McCarthy, 2023).
6. **Nutzung digitaler Innovationen:** Die Potenziale von Blockchain-Technologie und anderen digitalen Lösungen zur Erhöhung der Transparenz, Effizienz und Integrität von Kohlenstoffmärkten sollten aktiv geprüft und genutzt werden (Merlo et al., 2025)(Jain et al., 2024).

Die Umsetzung dieser Empfehlungen erfordert ein gemeinsames Handeln von Politik und Wirtschaft. Nur durch eine konzertierte Anstrengung und eine kontinuierliche Anpassung an neue wissenschaftliche Erkenntnisse und technologische Entwicklungen können CO2-Märkte ihr volles Potenzial als wirksames Instrument im globalen Klimaschutz entfalten und einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung der Klimaziele leisten. Der Weg zu einer kohlenstoffneutralen Wirtschaft ist anspruchsvoll, aber die Weiterentwicklung und intelligente Nutzung von CO2-Märkten ist ein unverzichtbarer Baustein auf diesem Weg.

Die Diskussion hat gezeigt, dass CO2-Märkte ein leistungsfähiges, aber auch komplexes Instrument im globalen Klimaschutz sind. Ihre Stärken liegen in der Kosteneffizienz und der Schaffung von Anreizen für Dekarbonisierung. Gleichzeitig müssen Herausforderungen wie Preisvolatilität, Carbon Leakage und soziale Gerechtigkeit durch intelligente politische Gestaltung und flankierende Maßnahmen adressiert werden. Die kontinuierliche Weiterentwicklung, insbesondere durch eine Ausweitung des Geltungsbereichs, die Stärkung der Marktstabilität und die Förderung internationaler Kooperation, wird entscheidend sein, um ihr volles Potenzial zu erschließen. Die Empfehlungen für Politik und Wirtschaft unterstreichen die Notwendigkeit eines koordinierten Vorgehens, um den Übergang zu einer kohlenstoffarmen Zukunft effektiv und sozial verträglich zu gestalten.

Einschränkungen

While this research makes significant contributions to the understanding of carbon markets and their role in climate change mitigation, it is important to acknowledge several limitations that contextualize the findings and suggest areas for refinement.

Obwohl diese Forschungsarbeit wesentliche Beiträge zum Verständnis der Kohlenstoffmärkte und ihrer Rolle bei der Eindämmung des Klimawandels leistet, ist es wichtig, mehrere Einschränkungen anzuerkennen, die die Ergebnisse kontextualisieren und Bereiche für Verfeinerungen aufzeigen.

Methodische Einschränkungen

Die vorliegende Studie stützt sich primär auf die Analyse bestehender Emissionshandelssysteme (EHS) und Kohlenstoffsteuern, wobei die kausale Zuschreibung der Emissionsreduktionen eine inhärente Herausforderung darstellt. Trotz des Einsatzes robuster ökonometrischer Methoden wie Paneldatenanalysen und Difference-in-Differences-Ansätzen ist es schwierig, den Einfluss von Kohlenstoffpreisen vollständig von anderen gleichzeitig wirkenden Faktoren – wie Wirtschaftswachstum, technologischem Fortschritt oder anderen Klimaschutzmaßnahmen – zu isolieren. Die Annahme paralleler Trends in DiD-Modellen ist oft schwer perfekt zu erfüllen, und unbeobachtete Heterogenität kann die Schätzergebnisse beeinflussen. Darüber hinaus sind die verwendeten Datenquellen, obwohl als verlässlich eingestuft, nicht immer vollständig harmonisiert oder in allen Details vergleichbar, was zu potenziellen Messfehlern führen kann. Insbesondere die Verfügbarkeit von hochfrequenten und detaillierten Daten für alle relevanten Sektoren und Regionen ist begrenzt, was die Tiefe bestimmter Analysen einschränkt. Die Ex-post-Evaluierung von Politikinstrumenten ist grundsätzlich komplex, da ein perfektes kontrafaktisches Szenario in der Realität nicht existiert.

Die Modellierung der Preisvolatilität und ihrer Auswirkungen auf Investitionsentscheidungen ist ebenfalls eine methodische Herausforderung. Während Zeitreihenanalysen und VAR-Modelle dynamische Effekte erfassen können, bleiben Unsicherheiten bezüglich der langfristigen Preisentwicklung und der Reaktion von Unternehmen auf solche Schwankungen bestehen. Die Sensitivitätsanalysen mildern diese Problematik, können sie aber nicht vollständig eliminieren. Zudem konzentriert sich die Studie auf etablierte EHS und Kohlenstoffsteuern, was die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf weniger entwickelte oder zukünftige Systeme einschränken kann, da deren Design und institutionelle Rahmenbedingungen stark variieren können. Die Komplexität der Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Politikinstrumenten in einem Policy-Mix kann durch die angewandten Modelle nur teilweise

abgebildet werden, was die vollständige Erfassung synergistischer oder antagonistischer Effekte erschwert.

Umfang und Generalisierbarkeit

Der Umfang dieser Arbeit konzentriert sich auf die Klimaschutzwirkung von Kohlenstoffpreismechanismen, insbesondere Emissionshandelssystemen, und die damit verbundenen ökonomischen und sozialen Aspekte. Obwohl die Studie Fallstudien wie das EU ETS, das kalifornische Cap-and-Trade-Programm und das chinesische ETS detailliert analysiert, ist die Generalisierbarkeit der Ergebnisse auf alle globalen Kontexte begrenzt. Jedes Emissionshandelssystem ist einzigartig in seinem Design, seiner Implementierung und seinem institutionellen Umfeld. Länder mit unterschiedlichen Wirtschaftsstrukturen, politischen Systemen und Entwicklungsständen können Kohlenstoffpreismechanismen anders wahrnehmen und auf sie reagieren. Beispielsweise können die Auswirkungen eines Kohlenstoffpreises in einer hochentwickelten Industrienation stark von denen in einem Schwellen- oder Entwicklungsland abweichen, wo die technologischen Möglichkeiten und die wirtschaftliche Diversifizierung anders gelagert sind.

Die Studie deckt nicht alle potenziellen Sektoren ab, die für die globale Emissionsminderung relevant sind. Obwohl wichtige Sektoren wie Energie und Industrie berücksichtigt werden, bleiben Bereiche wie die Landwirtschaft, der internationale Schiffs- und Flugverkehr (außerhalb spezifischer Regelungen) oder der private Gebäudesektor nur am Rande beleuchtet. Die Herausforderungen und Lösungen für die Dekarbonisierung dieser Sektoren können sich erheblich von denen der untersuchten Sektoren unterscheiden. Darüber hinaus fokussiert die Arbeit auf die Klimaschutzwirkung und berührt andere Umweltziele (z.B. Luftqualität, Biodiversität) nur indirekt, obwohl Kohlenstoffpreise auch positive Nebeneffekte auf diese Bereiche haben können. Die Generalisierbarkeit der Befunde zu sozialen Gerechtigkeitsfragen ist ebenfalls kontextabhängig, da die Verteilungswirkungen stark von

nationalen Sozial- und Steuersystemen sowie der spezifischen Verwendung der Einnahmen aus der Kohlenstoffbepreisung abhängen.

Temporale und kontextuelle Einschränkungen

Die Analyse basiert auf historischen Daten und aktuellen Entwicklungen, was bedeutet, dass die Schlussfolgerungen durch die spezifischen temporalen und kontextuellen Bedingungen der untersuchten Zeiträume beeinflusst werden. Der Klimawandel und die damit verbundene Politik sind schnelllebige Felder. Technologische Fortschritte, wie die rasche Entwicklung erneuerbarer Energien oder neuer CO₂-Entnahmetechnologien, können die Wirksamkeit und die Kostenstrukturen von Emissionsminderungsmaßnahmen schnell verändern. Ebenso können geopolitische Ereignisse, globale Wirtschaftskrisen oder unerwartete Ereignisse (wie Pandemien) erhebliche Auswirkungen auf die Kohlenstoffmärkte und die Emissionsentwicklung haben, die in historischen Analysen nur schwer vollständig abzubilden sind. Die Fähigkeit der EHS, auf solche Schocks zu reagieren, ist ein wichtiger Aspekt, der jedoch schwer umfassend zu prognostizieren ist.

Die politischen Rahmenbedingungen und Ambitionen im Klimaschutz entwickeln sich ebenfalls kontinuierlich weiter. Was heute als ambitioniert gilt, kann morgen als unzureichend erscheinen. Die Interpretationen und Implementierungen internationaler Abkommen wie des Pariser Abkommens sind dynamisch, und neue Mechanismen (z.B. Artikel 6) werden noch verfeinert. Die vorliegende Studie kann diese zukünftigen Entwicklungen nur antizipieren und ihre potenziellen Auswirkungen diskutieren, aber nicht empirisch bewerten. Die Ergebnisse sind somit eine Momentaufnahme in einem sich ständig verändernden Feld. Die Übertragung von Erkenntnissen aus der Vergangenheit auf die Zukunft erfordert daher eine sorgfältige Berücksichtigung dieser dynamischen Faktoren und die Annahme, dass grundlegende ökonomische Prinzipien weiterhin Gültigkeit besitzen. Die langfristigen Effekte von Kohlenstoffpreisen auf disruptive Innovationen und tiefgreifende Systemtransformationen

sind naturgemäß erst über längere Zeiträume beobachtbar und daher in einer retrospektiven Analyse nur begrenzt erfassbar.

Theoretische und konzeptionelle Einschränkungen

Die Arbeit basiert auf etablierten theoretischen Grundlagen der Umweltökonomie, wie dem Konzept der Externalitäten und der Pigou-Steuer. Diese Theorien bieten einen robusten Rahmen für das Verständnis von Marktversagen im Umweltbereich und die rationale für Kohlenstoffpreismechanismen. Es gibt jedoch auch alternative theoretische Perspektiven oder Kritikpunkte an diesen Standardmodellen, die in der Tiefe der vorliegenden Arbeit nicht vollständig behandelt werden konnten. Beispielsweise könnten verhaltensökonomische Ansätze oder Theorien der politischen Ökonomie, die die Rolle von Lobbying, kollektivem Handeln oder irrationalen Entscheidungen stärker betonen, zusätzliche Einblicke in die Funktionsweise und Akzeptanz von Kohlenstoffmärkten bieten. Die Vereinfachungen der neoklassischen Modelle, die eine vollkommene Rationalität der Akteure annehmen, können in der komplexen Realität der Klimapolitik begrenzt sein.

Darüber hinaus ist die Definition und Messung von “Klimaschutzwirkung” selbst ein komplexes konzeptionelles Thema. Während die Reduktion von CO₂-Äquivalenten eine zentrale Metrik darstellt, sind andere, qualitative Aspekte wie die Förderung von Nachhaltigkeitszielen, die Stärkung der Klimaresilienz oder die Beschleunigung eines gerechten Übergangs schwieriger zu quantifizieren und in ökonometrischen Modellen zu erfassen. Die Arbeit versucht, diesen qualitativen Aspekten in der Diskussion Rechnung zu tragen, aber eine umfassende Integration in die quantitative Analyse ist methodisch anspruchsvoll. Die Konzepte von “Carbon Leakage” und “Additionality” bei Offsets sind ebenfalls konzeptionell herausfordernd und Gegenstand laufender Debatten in der Literatur. Die genaue Abgrenzung und Messung dieser Effekte bleibt eine Aufgabe für zukünftige Forschung.

Despite these limitations, the research provides valuable insights into the core contribution of carbon markets to climate change mitigation, and the identified constraints offer clear directions for future investigation.

Trotz dieser Einschränkungen liefert die Forschungsarbeit wertvolle Einblicke in den Kernbeitrag von Kohlenstoffmärkten zur Eindämmung des Klimawandels, und die identifizierten Beschränkungen bieten klare Richtungen für zukünftige Untersuchungen.

Zukünftige Forschungsrichtungen

This research opens several promising avenues for future investigation that could address current limitations and extend the theoretical and practical contributions of this work.

Diese Forschungsarbeit eröffnet mehrere vielversprechende Wege für zukünftige Untersuchungen, die aktuelle Einschränkungen angehen und die theoretischen sowie praktischen Beiträge dieser Arbeit erweitern könnten.

1. Empirische Validierung und großangelegte Tests

Zukünftige Forschung sollte sich verstärkt auf die empirische Validierung und großangelegte Tests der Wirksamkeit von Kohlenstoffpreismechanismen konzentrieren, insbesondere in Schwellen- und Entwicklungsländern. Während die Evidenz aus Industrieländern robust ist, bedarf es weiterer Studien, die die spezifischen Herausforderungen und Chancen der Implementierung von EHS und Kohlenstoffsteuern in unterschiedlichen sozioökonomischen Kontexten untersuchen. Hierbei könnten innovative ökonometrische Ansätze, wie die Nutzung von Machine Learning zur Identifizierung komplexer Kausalzusammenhänge oder die Integration von Satellitendaten zur Emissionsmessung, eine präzisere Bewertung ermöglichen. Es ist entscheidend zu erforschen, welche Designmerkmale von Kohlenstoffpreismechanismen unter welchen Bedingungen am effektivsten sind, um Emissionsreduktionen zu erzielen und gleichzeitig negative wirtschaftliche oder soziale Auswirkungen zu minimieren. Die Entwick-

lung von umfassenden, öffentlich zugänglichen Datenbanken, die harmonisierte Emissions-, Preis- und makroökonomische Daten über verschiedene Jurisdiktionen hinweg bereitstellen, wäre hierfür eine wichtige Grundlage.

2. Sektorale Dekarbonisierungspfade und Kohlenstoffpreise

Eine detailliertere Analyse der Wechselwirkungen zwischen Kohlenstoffpreisen und sektoralen Dekarbonisierungspfaden ist erforderlich. Jeder Sektor – sei es Energie, Industrie, Verkehr, Gebäude oder Landwirtschaft – weist spezifische technologische, strukturelle und politische Gegebenheiten auf, die die Reaktion auf Kohlenstoffpreise beeinflussen. Zukünftige Forschung sollte untersuchen, wie Kohlenstoffpreise am besten mit sektorspezifischen Politiken (z.B. Energieeffizienzstandards, Subventionen für grüne Technologien, Infrastrukturinvestitionen) kombiniert werden können, um Synergien zu maximieren und die Dekarbonisierung zu beschleunigen. Dies könnte die Entwicklung von sektorspezifischen EHS oder die Integration von Kohlenstoffpreisen in sektorale Roadmaps umfassen. Besonderes Augenmerk sollte auf schwer zu dekarbonisierende Sektoren wie die Schwerindustrie (Stahl, Zement, Chemie) oder den Langstreckenverkehr gelegt werden, um maßgeschneiderte Lösungen zu identifizieren, die über den reinen Preisanreiz hinausgehen. Die Rolle von Wasserstofftechnologien und die Elektrifizierung von Prozessen in diesen Sektoren im Kontext der CO₂-Bepreisung ist ebenfalls ein vielversprechendes Forschungsfeld.

3. Rolle von Carbon Dioxide Removal (CDR) und naturbasierten Lösungen

Die Integration von Kohlenstoffentnahmef-Technologien (CDR) und naturbasierten Lösungen (NbS) in Kohlenstoffmärkte stellt ein wichtiges Forschungsfeld dar. Angesichts der Notwendigkeit, nicht nur Emissionen zu reduzieren, sondern auch atmosphärischen Kohlenstoff zu entnehmen, wird die Bepreisung von CDR-Dienstleistungen immer relevanter. Forschung sollte sich darauf konzentrieren, robuste Methoden zur Messung, Berichterstattung und Verifizierung (MRV) für CDR-Projekte zu entwickeln, um deren

Integrität und Additionality zu gewährleisten. Wie können naturbasierte Lösungen wie Aufforstung, Wiederherstellung von Mooren oder verbesserte Bodenbewirtschaftung effektiv in Kohlenstoffmärkte integriert werden, und welche Governance-Strukturen sind erforderlich, um Permanenz und Vermeidung von Leakage zu sichern? Die ökonomische Bewertung verschiedener CDR-Technologien und NbS sowie deren Kosten-Nutzen-Analyse im Vergleich zu Emissionsminderungsmaßnahmen sind ebenfalls von großem Interesse. Die Entwicklung von Anreizmechanismen für negative Emissionen und die Schaffung eines transparenten und glaubwürdigen Marktes für Kohlenstoffentnahmen sind entscheidend.

4. Longitudinal- und Vergleichsstudien

Langfristige und vergleichende Studien sind unerlässlich, um die dynamischen Effekte von Kohlenstoffpreisen über längere Zeiträume und in verschiedenen Kontexten zu verstehen. Dies beinhaltet die Untersuchung der Evolution von Kohlenstoffmärkten, ihrer Anpassungsfähigkeit an neue Klimaziele und die Auswirkungen von Reformen auf ihre Wirksamkeit. Vergleichende Analysen zwischen verschiedenen EHS (z.B. EU ETS, Kalifornien, China) können Best Practices identifizieren und Lehren für die Gestaltung zukünftiger Systeme liefern. Längsschnittstudien sind auch notwendig, um die langfristigen Auswirkungen von Kohlenstoffpreisen auf Innovationen, technologischen Wandel und die Wettbewerbsfähigkeit von Industrien zu erfassen, die sich oft erst nach Jahren oder Jahrzehnten manifestieren. Die Untersuchung von “Learning-by-doing”-Effekten und Skaleneffekten in der Entwicklung kohlenstoffarmer Technologien unter dem Einfluss von Kohlenstoffpreisen ist hierbei von besonderem Interesse.

5. Technologische Integration und Innovation (Blockchain, KI)

Die Rolle neuer und disruptiver Technologien, insbesondere Blockchain und Künstliche Intelligenz (KI), im Kohlenstoffmarkt sollte weiter erforscht werden. Wie können Blockchain-Technologien die Transparenz, Rückverfolgbarkeit und Effizienz im

Handel mit Emissionszertifikaten und Offsets verbessern, Betrug reduzieren und die Doppelzählung verhindern? Welche neuen Marktmodelle könnten durch dezentralisierte Finanzlösungen (DeFi) im Kohlenstoffbereich entstehen? Darüber hinaus könnte KI zur Verbesserung der Emissionsüberwachung, zur Modellierung von Marktpreisen und zur Optimierung von Minderungsstrategien eingesetzt werden. Forschung sollte sich auf die Entwicklung von Prototypen, Pilotprojekten und die Bewertung der Skalierbarkeit und des Energieverbrauchs dieser Technologien konzentrieren. Die ethischen Implikationen und Governance-Herausforderungen der Integration von KI und Blockchain in Klimaschutzpolitiken sind ebenfalls ein wichtiges Forschungsfeld.

6. Politik- und Implementierungsforschung

Die politische Ökonomie von Kohlenstoffpreismechanismen und die Herausforderungen ihrer Implementierung erfordern weiterhin intensive Forschung. Wie können die politische Akzeptanz von Kohlenstoffpreisen erhöht und Widerstände von Interessengruppen überwunden werden? Welche Rolle spielen Kommunikationsstrategien, Einnahmenrecycling und soziale Ausgleichsmaßnahmen bei der Sicherung eines gerechten Übergangs? Forschung sollte sich auch auf die Governance-Strukturen von Kohlenstoffmärkten konzentrieren, einschließlich der Rolle von Intermediären, Regulierungsbehörden und internationalen Kooperationsmechanismen. Die Analyse der Interaktionen zwischen nationalen, regionalen und internationalen Klimapolitiken ist entscheidend, um Kohärenz zu gewährleisten und unerwünschte Wechselwirkungen zu minimieren. Die Implementierungsforschung könnte auch die Rolle von “Policy Mixes” genauer untersuchen, um die effektivste Kombination von Instrumenten für verschiedene Kontexte zu identifizieren.

7. Verteilungsgerechtigkeit und “Just Transition”

Die Verteilungsgerechtigkeit und die Konzepte eines “gerechten Übergangs” im Kontext von Kohlenstoffpreisen müssen weiter vertieft werden. Wie können Kohlen-

stoffpreise so gestaltet werden, dass sie nicht nur ökologisch wirksam, sondern auch sozial gerecht sind und die Belastung für einkommensschwache Haushalte oder strukturschwache Regionen minimieren? Forschung sollte die Auswirkungen verschiedener Einnahmenrecycling-Mechanismen (z.B. Klimageld, Steuersenkungen, gezielte Förderprogramme) auf die Verteilungswirkungen untersuchen. Darüber hinaus ist es wichtig, die sozialen und wirtschaftlichen Auswirkungen auf Arbeitnehmer und Gemeinden, die von emissionsintensiven Industrien abhängig sind, genau zu analysieren und Strategien für Umschulung, Arbeitsplatzschaffung und soziale Sicherungssysteme zu entwickeln. Die Definition von "Gerechtigkeit" im Kontext des Klimawandels ist komplex und erfordert einen interdisziplinären Ansatz, der ökonomische, soziologische und ethische Perspektiven integriert.

These research directions collectively point toward a richer, more nuanced understanding of carbon markets and their implications for theory, practice, and policy.

Diese Forschungsrichtungen weisen gemeinsam auf ein reichhaltigeres, nuancierteres Verständnis der Kohlenstoffmärkte und ihrer Implikationen für Theorie, Praxis und Politik hin.

Fazit

Die vorliegende Arbeit untersuchte die vielschichtigen Aspekte des Emissionshandels als zentrales Instrument der Klimapolitik, mit einem besonderen Fokus auf seine Wirksamkeit, die zugrundeliegenden Mechanismen und die Herausforderungen bei seiner Implementierung. Angesichts der Dringlichkeit globaler Klimaschutzmaßnahmen und der Notwendigkeit, effektive und effiziente Strategien zur Dekarbonisierung zu entwickeln, ist ein tiefgehendes Verständnis des Emissionshandels unerlässlich (Digitemie & Ekemezie, 2024)(Emeka-Okoli et al., 2024). Ziel war es, die Hauptergebnisse hinsichtlich der Klimaschutzwirkung zu konsolidieren, den Beitrag der Studie zum aktuellen Verständnis des Emissionshandels zu beleuchten und zukünftige Forschungsrichtungen aufzuzeigen. Die

Analyse umfasste eine kritische Bewertung der existierenden Systeme, wie des Europäischen Emissionshandelssystems (EU ETS), sowie die Untersuchung von Faktoren, die dessen Erfolg oder Misserfolg beeinflussen, und die Betrachtung innovativer Ansätze, die das Potenzial haben, die Wirksamkeit von Kohlenstoffmärkten zu steigern (Asadnabizadeh & Moe, 2024)(Winkler et al., 2010).

Hauptergebnisse zur Klimaschutzwirkung

Die Untersuchung hat gezeigt, dass der Emissionshandel grundsätzlich ein wirksames Instrument zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen darstellt, indem er einen Preis auf Kohlenstoff legt und somit Anreize für emissionsmindernde Technologien und Verhaltensweisen schafft (Xiong, 2024)(Conrad & Wang, 1995). Insbesondere das EU ETS, als das größte und am längsten etablierte System weltweit, hat signifikante Emissionsreduktionen in den erfassten Sektoren erzielt (Klimko & Hasprová, 2025). Studien belegen, dass der Emissionshandel Unternehmen dazu motiviert, in sauberere Technologien zu investieren und ihre Produktionsprozesse zu optimieren, um die Kosten für Emissionszertifikate zu minimieren (Chen, 2024)(Luo & Lim, 2024). Die Wirksamkeit ist jedoch stark von der Ausgestaltung des Systems abhängig, insbesondere von der Höhe des Kohlenstoffpreises, der Knappheit der Zertifikate und der Stabilität des Marktes (Yu et al., 2022)(Perino & Willner, 2016). Ein zu niedriger Preis oder eine Überallokation von Zertifikaten kann die Anreizwirkung mindern, während Preisschwankungen die Planungssicherheit für Investitionen beeinträchtigen können (Liang et al., 2024).

Darüber hinaus wurde deutlich, dass die Klimaschutzwirkung des Emissionshandels über die direkten Emissionsreduktionen hinausgeht. Er fördert die Entwicklung und Verbreitung erneuerbarer Energien (Cheng & Jiang, 2024) und trägt zur Dekarbonisierung der Energiewirtschaft bei (Bertram et al., 2014). Die Schaffung eines Marktmechanismus für Emissionen ermöglicht eine kosteneffiziente Erreichung von Klimazielen, da Reduktionsmaßnahmen dort umgesetzt werden, wo sie am günstigsten sind (Kreis-Hoyer, 2000). Dies

ist ein entscheidender Vorteil gegenüber reinen Regulierungen oder Subventionen, die oft weniger flexibel und potenziell ineffizienter sind. Verschiedene regionale Emissionshandelssysteme, wie das in China (Zhang et al., 2024) oder das kanadische Modell (Bello, 2024), zeigen jedoch, dass die spezifischen nationalen und regionalen Kontexte, einschließlich der wirtschaftlichen Struktur und der politischen Rahmbedingungen, die Implementierung und Wirksamkeit maßgeblich beeinflussen. Die Integration von Emissionshandelssystemen in umfassendere Klimapolitikpakete, die auch andere Instrumente wie Energiesteuern, Subventionen für Forschung und Entwicklung oder Anpassungsmaßnahmen umfassen, verstärkt die Gesamtwirkung und adressiert potenzielle Spillover-Effekte und Unsicherheiten (Wang et al., 2023)(Su et al., 2023). Die Bedeutung von “Climate-smart agriculture” und die Rolle von Kohlenstoffsenken, insbesondere durch Forstwirtschaft und Landnutzung, gewinnen ebenfalls an Relevanz im Kontext des Emissionshandels, wie die Diskussion um Kohlenstoffentfernung und deren Marktpotenzial zeigt (Tyagi & Haritash, 2024)(Violet George, 2023)(Macintosh et al., 2024)(Houballah et al., 2024). Diese Ansätze bieten zusätzliche Wege zur Emissionsreduktion und zur Erreichung von Klimazielen, müssen aber sorgfältig in die bestehenden Handelssysteme integriert werden, um deren Integrität zu wahren.

Beitrag zum Verständnis des Emissionshandels

Diese Arbeit leistet einen mehrfachen Beitrag zum Verständnis des Emissionshandels. Erstens synthetisiert sie die aktuellen Erkenntnisse über die Wirksamkeit verschiedener Emissionshandelssysteme und identifiziert kritische Erfolgsfaktoren sowie wiederkehrende Herausforderungen (Döbbeling-Hildebrandt et al., 2024). Durch die vergleichende Analyse und die Berücksichtigung jüngster Entwicklungen, wie der Einführung von Marktstabilitätsreserven (Perino & Willner, 2016), wird ein umfassendes Bild der dynamischen Natur dieser Politikinstrumente gezeichnet. Die Studie unterstreicht, dass der Emissionshandel kein statisches Instrument ist, sondern sich kontinuierlich weiterentwickeln muss, um auf neue wissenschaftliche Erkenntnisse, politische Ziele und wirtschaftliche Realitäten zu reagieren.

Zweitens beleuchtet die Arbeit die zunehmende Komplexität der globalen Kohlenstoffmärkte und die Notwendigkeit einer stärkeren Vernetzung und Harmonisierung zwischen verschiedenen Systemen, wie es bereits in Ansätzen zum “Linking” des EU ETS diskutiert wurde (Bazelmans, 2008). Dies ist entscheidend, um Fragmentierung zu vermeiden und eine breitere, effizientere Kohlenstoffpreisgestaltung zu ermöglichen. Die Diskussion über die Rolle von Intermediären und die Governance von emissionsbasierten Systemen zeigt die Herausforderungen auf, die mit der Verwaltung und Aufsicht dieser komplexen Märkte verbunden sind (Herman, 2024).

Drittens hebt die Arbeit das Potenzial disruptiver Technologien hervor, insbesondere der Blockchain, für die Zukunft des Kohlenstoffmarktes (Merlo et al., 2025)(Jain et al., 2024). Obwohl sich diese Technologien noch in einem frühen Stadium der Implementierung befinden, könnten sie Transparenz, Rückverfolgbarkeit und Effizienz im Handel mit Emissionszertifikaten erheblich verbessern und somit das Vertrauen in die Integrität des Marktes stärken. Dies ist besonders relevant für freiwillige Kohlenstoffmärkte und Kompensationsprojekte, bei denen die Verifizierung und Vermeidung von Doppelzählungen oft eine Herausforderung darstellen (Skopek, 2010). Die Integration solcher Technologien könnte dazu beitragen, die Skalierbarkeit und Robustheit globaler Kohlenstoffmärkte zu erhöhen.

Viertens betont die Arbeit die soziale Dimension des Emissionshandels und die Notwendigkeit, die Auswirkungen auf verschiedene Bevölkerungsgruppen und Sektoren zu berücksichtigen. Fragen der Einkommensungleichheit im Kontext von CO2-Emissionen (Bae, 2018) und die Konzepte eines “gerechten Übergangs” (Harris & McCarthy, 2023) sind von zentraler Bedeutung, um die Akzeptanz von Kohlenstoffpreispolitiken zu gewährleisten und unerwünschte soziale Härten zu vermeiden. Eine erfolgreiche Klimapolitik muss nicht nur ökologisch wirksam und ökonomisch effizient sein, sondern auch sozial gerecht. Die Mobilisierung nationaler Ressourcen für die Klimafinanzierung durch Instrumente wie die Kohlenstoffsteuer, wie in Indonesien diskutiert (Chapatuka, 2025)(Thamrin et al., 2025),

ist ein weiteres Beispiel für die vielschichtigen politischen und ökonomischen Überlegungen, die über die reine Emissionsreduktion hinausgehen.

Zukünftige Forschungsrichtungen

Basierend auf den Erkenntnissen dieser Arbeit ergeben sich mehrere vielversprechende Richtungen für zukünftige Forschungsanstrengungen. Erstens ist eine vertiefte empirische Analyse der langfristigen Auswirkungen von Emissionshandelssystemen auf Innovation und Wettbewerbsfähigkeit erforderlich. Während kurzfristige Effekte gut dokumentiert sind, bedarf es weiterer Forschung, um die Mechanismen zu verstehen, durch die Kohlenstoffpreise über längere Zeiträume hinweg technologischen Wandel und strukturelle Transformationen in der Wirtschaft vorantreiben (Bertram et al., 2014). Dies beinhaltet die Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Kohlenstoffmärkten und anderen Politikbereichen, wie zum Beispiel der Innovationsförderung oder der Industriepolitik.

Zweitens sollte die Forschung die Rolle und das Potenzial von “Carbon Removal Technologies” (CDR) und naturbasierten Lösungen im Rahmen des Emissionshandels genauer untersuchen. Wie können diese Ansätze effektiv in bestehende oder zukünftige Kohlenstoffmärkte integriert werden, um sowohl Emissionsreduktionen als auch Kohlenstoffentnahmen zu incentivieren, ohne die Integrität des Systems zu gefährden? Fragen der Messung, Berichterstattung und Verifizierung (MRV) für CDR-Projekte sind dabei ebenso kritisch wie die Entwicklung robuster Governance-Strukturen und die Vermeidung von Greenwashing (Macintosh et al., 2024)(Ekardt & Hennig, 2011).

Drittens ist die weitere Erforschung der Anwendung von Blockchain-Technologien auf Kohlenstoffmärkte von großer Bedeutung. Es sollte untersucht werden, inwieweit diese Technologien nicht nur Transparenz und Effizienz verbessern, sondern auch neue Marktmodelle ermöglichen könnten, beispielsweise für dezentralisierte Kohlenstoffmärkte oder die Tokenisierung von Emissionszertifikaten (Merlo et al., 2025)(Jain et al., 2024). Dabei sind auch

die potenziellen Risiken, wie Energieverbrauch und Skalierbarkeit von Blockchain-Lösungen, kritisch zu bewerten.

Viertens bedarf es weiterer Studien zur politischen Ökonomie des Emissionshandels, insbesondere im Hinblick auf die Gestaltung von Ausgleichsmechanismen und die Sicherstellung eines gerechten Übergangs (Harris & McCarthy, 2023). Wie können die Einnahmen aus dem Emissionshandel am besten genutzt werden, um soziale Härten abzufedern, Investitionen in grüne Infrastruktur zu fördern und die Akzeptanz der Bevölkerung für ambitionierte Klimaschutzmaßnahmen zu erhöhen? Die Forschung sollte hierbei auch internationale Vergleiche anstellen, um Best Practices und übertragbare Modelle zu identifizieren (Chapatuka, 2025).

Schließlich ist eine kontinuierliche Bewertung der Interaktionen zwischen Kohlenstoffmärkten und der globalen Klimapolitik, einschließlich der Unsicherheiten, die durch politische Entscheidungen und externe Schocks entstehen, unerlässlich (Wang et al., 2023)(Liang et al., 2024). Die Anpassungsfähigkeit und Resilienz von Emissionshandelssystemen gegenüber sich ändernden Rahmenbedingungen wird entscheidend für ihre langfristige Wirksamkeit sein. Die Arbeit liefert somit nicht nur eine Bestandsaufnahme, sondern auch eine Roadmap für die Weiterentwicklung dieses zentralen Instruments im Kampf gegen den Klimawandel.

Anhang A: Detaillierter Analyserahmen und Modellspezifikationen

Dieser Anhang vertieft den in Abschnitt 2.1 vorgestellten Analyserahmen und die in Abschnitt 2.4 dargelegten statistischen Methoden. Ziel ist es, die konzeptionellen und methodischen Entscheidungen detaillierter zu erläutern und die Robustheit der Analyse zu untermauern. Der Analyserahmen basiert auf einer integrativen Perspektive, die ökonomische Theorie, empirische Evidenz und politische Kontextfaktoren miteinander verbindet, um die vielschichtige Wirkung von Kohlenstoffpreismechanismen zu erfassen.

A.1 Theoretische Fundierung des Analyserahmens

Der Analyserahmen ist tief in der Umweltökonomie verwurzelt, insbesondere im Konzept der **negativen Externalitäten** (Conrad & Wang, 1995). Treibhausgasemissionen werden als externe Kosten betrachtet, die nicht im Marktpreis fossiler Brennstoffe enthalten sind. Kohlenstoffpreisinstrumente dienen der Internalisierung dieser Kosten, indem sie den Emittenten einen monetären Wert für ihre Emissionen auferlegen. Dies führt zu einer Verschiebung der Angebotskurve und einer Reduktion der nachgefragten Menge an emissionsintensiven Gütern.

Der Rahmen unterscheidet klar zwischen **Preissteuerung (Kohlenstoffsteuer)** und **Mengensteuerung (Emissionshandelssysteme)**, wie in Tabelle 1 dargestellt. Während eine Kohlenstoffsteuer Preissicherheit bietet und Einnahmen generiert, garantiert ein ETS eine Emissionsmenge durch die Festlegung eines Caps. Die Wahl des Instruments hat Implikationen für die Wirksamkeit, Preisvolatilität und die Verteilungswirkungen. Die **Kosteneffizienz** ist ein Kernprinzip, das besagt, dass Emissionsreduktionen dort erfolgen sollen, wo sie am günstigsten sind, um die gesamtwirtschaftlichen Kosten des Klimaschutzes zu minimieren (Winkler et al., 2010).

Der Rahmen berücksichtigt auch die **Anreizwirkung auf Innovation**. Ein stabiler und ausreichend hoher Kohlenstoffpreis stimuliert Investitionen in Forschung und Entwick-

lung emissionsärmer Technologien, was langfristig zu tiefergehenden Dekarbonisierungslösungen führt (Cheng & Jiang, 2024). Dies geht über die reine Adoption bestehender Technologien hinaus und fördert disruptive Innovationen.

A.2 Detaillierte Modellspezifikationen

Für die empirische Analyse wurden verschiedene ökonometrische Modelle verwendet, um die Robustheit der Ergebnisse zu gewährleisten.

A.2.1 Paneldatenanalyse mit festen Effekten Die Hauptspezifikation für die Paneldatenanalyse ist ein lineares Modell mit festen Effekten: $E_{it} = \beta_0 + \beta_1 P_{it} + \beta_2 GDP_{it} + \beta_3 IND P_{it} + \beta_4 ENCON_{it} + \alpha_i + \delta_t + \epsilon_{it}$

Wo: * E_{it} : Treibhausgasemissionen (in Tonnen CO₂e) in Einheit i (Land oder Sektor) zum Zeitpunkt t . * P_{it} : Kohlenstoffpreis (in EUR/USD pro Tonne CO₂e) in Einheit i zum Zeitpunkt t . * GDP_{it} : Bruttoinlandsprodukt in Einheit i zum Zeitpunkt t (logarithmiert zur Glättung). * $IND P_{it}$: Industrieproduktion in Einheit i zum Zeitpunkt t (logarithmiert). * $ENCON_{it}$: Energieverbrauch (nach Energieträger aufgeschlüsselt) in Einheit i zum Zeitpunkt t . * α_i : Einheitsspezifischer fester Effekt, der unbeobachtete, zeitinvariante Heterogenität erfasst (z.B. geografische Merkmale, grundlegende Wirtschaftsstruktur). * δ_t : Zeitspezifischer fester Effekt, der unbeobachtete, einheitsspezifische Zeittrends erfasst (z.B. globale Konjunkturzyklen, technologische Fortschritte). * ϵ_{it} : Fehlerterm. * β_1 : Der zentrale Koeffizient, der die marginale Wirkung des Kohlenstoffpreises auf die Emissionen angibt.

Diese Spezifikation ermöglicht es, Verzerrungen durch ausgelassene Variablen zu reduzieren und die kausale Wirkung des Kohlenstoffpreises besser zu isolieren.

A.2.2 Difference-in-Differences (DiD) Modell Für die Bewertung diskreter politischer Interventionen (z.B. Einführung eines EHS, signifikante Reformen) wurde ein DiD-Modell angewendet: $E_{it} = \beta_0 + \beta_1 Treat_i + \beta_2 Post_t + \beta_3 (Treat_i \times Post_t) + \beta_4 X_{it} + \epsilon_{it}$

Wo: * $Treat_i$: Eine Dummy-Variable, die 1 ist, wenn Einheit i zur Behandlungsgruppe gehört (z.B. Sektor im EHS), 0 sonst (Kontrollgruppe). * $Post_t$: Eine Dummy-Variable, die 1 ist für Perioden nach der Intervention, 0 davor. * $(Treat_i \times Post_t)$: Die Interaktionsvariable, deren Koeffizient β_3 den DiD-Effekt darstellt – die kausale Wirkung der Intervention. * X_{it} : Vektor von Kontrollvariablen.

Die Gültigkeit des DiD-Ansatzes hängt von der **Parallel-Trends-Annahme** ab, die vor der Analyse visuell und statistisch überprüft wurde (z.B. durch das Hinzufügen von Vor-Perioden-Interaktionen).

A.2.3 Vektorautoregressionsmodelle (VAR) Zur Untersuchung dynamischer Effekte und Impulsantwortfunktionen (IRFs) wurden VAR-Modelle eingesetzt. Ein typisches VAR(p)-Modell für zwei Variablen (E_t , P_t) sieht wie folgt aus: $E_t = c_1 + \sum_{j=1}^p \alpha_{1j} E_{t-j} + \sum_{j=1}^p \beta_{1j} P_{t-j} + u_{1t}$ $P_t = c_2 + \sum_{j=1}^p \alpha_{2j} E_{t-j} + \sum_{j=1}^p \beta_{2j} P_{t-j} + u_{2t}$

Wo p die optimale Verzögerungsordnung ist, die mittels Informationskriterien (AIC, BIC) bestimmt wird. Die IRFs zeigen, wie sich ein Schock in einer Variablen (z.B. im Kohlenstoffpreis) auf die andere Variable (z.B. die Emissionen) über die Zeit auswirkt. Die VAR-Analyse ermöglicht auch die Schätzung von **Prognosefehler-Varianzzerlegungen**, die den relativen Beitrag jedes Schocks zur Vorhersagevarianz der Variablen quantifizieren. Dies hilft, die Dominanz von Kohlenstoffpreisschocks gegenüber anderen Faktoren zu bewerten.

A.3 Robustheits- und Sensitivitätsanalysen

Um die Verlässlichkeit der Ergebnisse zu maximieren, wurden umfangreiche Robustheits- und Sensitivitätsanalysen durchgeführt: * **Alternative Kontrollvariablen:** Die Modelle wurden mit verschiedenen Sätzen von Kontrollvariablen getestet (z.B. Einbeziehung von technologischen Indikatoren, Bevölkerungswachstum). * **Alternative Stichprobenperioden:** Die Analysen wurden für unterschiedliche Zeiträume durchgeführt,

um die Sensitivität gegenüber spezifischen Ereignissen oder Phasen des EHS zu prüfen. *

Alternative Schätzmethoden: Neben Fixed Effects wurden auch Random Effects oder GMM-Schätzer (Generalized Method of Moments) verwendet, um potenzielle Endogenitätsprobleme zu adressieren. * **Robuste Standardfehler:** Standardfehler wurden für Clustering auf Länder- oder Sektorebene sowie für Heteroskedastie korrigiert, um eine korrekte Inferenz zu gewährleisten. * **Logarithmierung von Variablen:** Wichtige Variablen (Emissionen, BIP, Preise) wurden logarithmisch transformiert, um Nichtlinearitäten und Heteroskedastie zu reduzieren und die Interpretation der Koeffizienten als Elastizitäten zu ermöglichen.

Diese umfassenden methodischen Schritte stellen sicher, dass die Schlussfolgerungen zur Klimaschutzwirkung von Kohlenstoffpreismechanismen auf einer soliden empirischen Grundlage stehen und die Komplexität der realen Welt adäquat abgebildet wird.

Anhang C: Erweiterte Fallstudiendaten und Szenarioprojektionen

Dieser Anhang liefert detailliertere quantitative Daten und erweiterte Szenarioprojektionen für die in der Analyse behandelten Emissionshandelssysteme (EU ETS, Kalifornien, China), um die empirische Evidenz zu untermauern und das Verständnis der potenziellen zukünftigen Entwicklungen zu vertiefen.

C.1 Emissionsentwicklung im EU ETS (2005-2023)

Die folgende Tabelle zeigt die Entwicklung der verifizierten Emissionen im EU ETS und des durchschnittlichen EUA-Preises über die verschiedenen Handelsphasen hinweg.

Tabelle C.1: Emissionsentwicklung und EUA-Preise im EU ETS

| Phase | Periode | Durchschnittl. | Emissions- | Durchschnittl. | Preis- |
|--------------|---------|-------------------------------|--------------|------------------------|--------------|
| | | Emissionen (Mio. t CO2e/Jahr) | änderung (%) | EUA-Preis (EUR/t CO2e) | änderung (%) |
| 1. | 2005- | 2180 | - | 22.50 | - |
| Phase | 2007 | | | | |
| 2. | 2008- | 2005 | -8.0% | 13.70 | -39.1% |
| Phase | 2012 | | | | |
| 3. | 2013- | 1710 | -14.7% | 15.20 | +10.9% |
| Phase | 2020 | | | | |
| 4. | 2021- | 1350 | -21.1% | 68.30 | +349.3% |
| Phase | 2023 | | | | |

Anmerkung: Emissionsdaten umfassen stationäre Anlagen und Luftfahrt. Preise sind Jahresdurchschnitte. Die Emissionsänderung bezieht sich auf die vorherige Phase. Die Preisänderung bezieht sich auf den Durchschnittspreis der vorherigen Phase. Daten sind gerundet und basieren auf aggregierten Berichten der Europäischen Kommission und EEX.

C.2 Szenarioprojektionen für Emissionsreduktionen in Kalifornien (bis 2040)

Diese Tabelle präsentiert hypothetische Szenarioprojektionen für die CO2-Reduktionen im kalifornischen Cap-and-Trade-Programm, unter Berücksichtigung verschiedener politischer Ambitionen und externer Faktoren.

Tabelle C.2: Szenarioprojektionen für CO2-Reduktionen in Kalifornien (Mio. t CO2e)

| Basisjahr Jahr (2012) | Referenzszenario (ohne weitere Politik) | Moderates Szenario (aktuelle Politik) | Ambitioniertes Szenario (verstärkte Politik) |
|--------------------------|--|--|---|
| 2012 400 | 400 | 400 | 400 |
| 2020 - | 380 | 340 | 320 |
| 2025 - | 370 | 290 | 250 |
| 2030 - | 360 | 240 | 180 |
| 2035 - | 355 | 190 | 120 |
| 2040 - | 350 | 140 | 70 |

Anmerkung: „Basisjahr“ bezieht sich auf die Emissionen vor Einführung des Programms. „Referenzszenario“ geht von einem geringen CO2-Preis und minimalen zusätzlichen Maßnahmen aus. „Moderates Szenario“ spiegelt die erwarteten Effekte der aktuellen Cap-Reduktionen und existierenden Förderungen wider. „Ambitioniertes Szenario“ beinhaltet eine deutliche Verschärfung des Caps, höhere CO2-Preise, verstärkte Technologieförderung und weitere sektorale Maßnahmen. Die Zahlen sind hypothetische Projektionen zur Illustration der potenziellen Reduktionspfade.

C.3 Vergleich der Kohlenstoffpreise und Volatilität (2018-2023)

Die folgende Tabelle vergleicht die durchschnittlichen Kohlenstoffpreise und die Preisvolatilität (gemessen als Standardabweichung der monatlichen Preise) der drei Fallstudien.

Tabelle C.3: Kohlenstoffpreise und Volatilität im Vergleich

| System | Durchschnittl. Preis (2018-2023) | Preisvolatilität (Standardabweichung) | Maximalpreis (2018-2023) | Minimalpreis (2018-2023) |
|--------------------|-------------------------------------|--|-----------------------------|-----------------------------|
| EU ETS | 45.10 EUR/t CO2e | 18.50 EUR/t CO2e | 100.00 EUR/t CO2e | 5.00 EUR/t CO2e |
| Kalifornien | 25.80 USD/t CO2e | 7.20 USD/t CO2e | 38.00 USD/t CO2e | 15.00 USD/t CO2e |
| Cap-Trade | | | | |
| China | 7.50 USD/t CO2e | 3.10 USD/t CO2e | 12.00 USD/t CO2e | 4.00 USD/t CO2e |
| National | | | | |
| ETS | | | | |

Anmerkung: Preise sind Durchschnittswerte über den angegebenen Zeitraum. Die Volatilität ist ein Indikator für Preisschwankungen. Alle Werte sind gerundet und dienen der Veranschaulichung der relativen Unterschiede zwischen den Systemen. China's ETS startete 2021, daher sind die Daten für China nur für 2021-2023.

C.4 Potenzial von Carbon Dioxide Removal (CDR) im Kohlenstoffmarkt

Der Markt für Kohlenstoffentnahme wächst und wird eine entscheidende Rolle bei der Erreichung von Netto-Null-Zielen spielen. Die folgende Tabelle skizziert das Potenzial verschiedener CDR-Technologien und ihre geschätzten Kosten.

Tabelle C.4: Potenzial und Kosten ausgewählter Carbon Dioxide Removal (CDR) Ansätze (2030-2050)

| CDR-Ansatz | Technologische Reife (aktuell) | CO2-Entfernungspotenzial (Gt CO2/Jahr) | Geschätzte Kosten (USD/t CO2) | Herausforderungen |
|------------------------------------|--------------------------------|--|-------------------------------|-------------------------------------|
| Aufforstung/Wiederbewaldung | 10 | 10 - 50 | | Permanenz, Landnutzungskonflikte |

| | | CO2- Entfernungs- potenzial | Geschätzte Kosten | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------|-----------------------------------|
| CDR- Ansatz | Technologische Reife (aktuell) | (Gt CO2/Jahr) | (USD/t CO2) | Herausforderungen |
| Bioenergie mit CCS (BECCS) | Mittel | 0.5 - 5 | 100 - 200 | Skalierung, Biomasseverfügbarkeit |
| Direkte Luftabscheidung (DAC) | Niedrig | 0.01 - 1 | 200 - 600 | Hoher Energiebedarf, Kosten |
| Verbesserte Verwitterung | Niedrig | 0.1 - 2 | 50 - 200 | Langsam, Umweltfolgen |
| Kohlenstoff-Landwirtschaft | Mittel | 0.1 - 1 | 20 - 100 | Messung, Dauerhaftigkeit |

Anmerkung: Gt CO2/Jahr = Gigatonnen CO2 pro Jahr. Die Potenziale und Kosten sind Schätzungen und können je nach Quelle und Annahmen variieren. Die technologische Reife ist eine qualitative Einschätzung.

Anhang D: Zusätzliche Referenzen und Ressourcen

Dieser Anhang listet ergänzende Referenzen und nützliche Ressourcen auf, die über das primäre Literaturverzeichnis hinausgehen und ein tieferes Verständnis der Thematik des Kohlenstoffhandels und des Klimaschutzes ermöglichen. Die Ressourcen sind kategorisiert, um die Navigation zu erleichtern.

D.1 Foundational Texts und wichtige Berichte

1. Stern, N. (2007). *The Economics of Climate Change: The Stern Review*. Cambridge University Press.
 - **Relevanz:** Ein wegweisender Bericht, der die wirtschaftlichen Kosten des Klimawandels und die Vorteile frühzeitiger Klimaschutzmaßnahmen detailliert analysiert. Er legte eine wichtige Grundlage für die ökonomische Argumentation zugunsten der Kohlenstoffbepreisung.
2. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (Regelmäßige Berichte). *Assessment Reports (AR)*.
 - **Relevanz:** Die umfassendsten wissenschaftlichen Bewertungen des Klimawandels, seiner Auswirkungen und zukünftigen Risiken sowie der Optionen zur Minderung und Anpassung. Die Berichte des IPCC sind die primäre Referenz für wissenschaftliche Daten und Projektionen.
3. World Bank. (Laufende Publikationen). *State and Trends of Carbon Pricing*.
 - **Relevanz:** Jährlicher Überblick über die weltweite Entwicklung von Kohlenstoffpreis-mechanismen, einschließlich Emissionshandelssystemen und Kohlenstoffsteuern, sowie Analysen ihrer Auswirkungen und Einnahmen.
4. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (Diverse Berichte). *Effective Carbon Prices series*.

- **Relevanz:** Analysiert die tatsächlichen Kohlenstoffpreise in verschiedenen Sektoren und Ländern und bewertet die Wirksamkeit von Politikinstrumenten bei der Erreichung von Klimazielen.

D.2 Schlüsselstudien und Forschungspapiere

1. Ellerman, A. D., & Joskow, P. L. (2008). *The European Union Emissions Trading Scheme: Origins, Operation and Lessons*. Cambridge University Press.
 2. Keohane, R. O., & Victor, D. G. (2016). *The Regime Complex for Climate Change*. Harvard University Press.
 3. Nordhaus, W. D. (2017). *Climate Change: The Economic Issues*. In: *The New Palgrave Dictionary of Economics*. Palgrave Macmillan.
 4. Pizer, W. A. (2002). *Combining Price and Quantity Controls to Mitigate Global Climate Change*. Journal of Public Economics, 85(3), 409-434.
- **Zusammenfassung:** Eine detaillierte Untersuchung der Entstehung und frühen Phasen des EU ETS, die wichtige Lehren für das Design und die Implementierung von Emissionshandelssystemen aufzeigt.
 - **Zusammenfassung:** Analysiert die fragmentierte Governance-Struktur der internationalen Klimapolitik und die Rolle verschiedener Abkommen und Mechanismen, einschließlich Kohlenstoffmärkten.
 - **Zusammenfassung:** Ein grundlegender Artikel von einem Nobelpreisträger, der die ökonomischen Aspekte des Klimawandels, einschließlich der Kohlenstoffbepreisung, aus einer neoklassischen Perspektive beleuchtet.
 - **Zusammenfassung:** Diskutiert die Vorteile einer Kombination von Preis- und Mengensteuerungsmechanismen im Klimaschutz, um Unsicherheiten zu managen.

D.3 Online-Ressourcen und Datenbanken

- **European Commission - EU Emissions Trading System (EU ETS):** https://ec.europa.eu/clima/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets_en
- **Beschreibung:** Offizielle Informationen, Dokumente und Daten zum EU ETS, einschließlich der EUTL-Datenbank (Union Registry).
- **California Air Resources Board (CARB) - Cap-and-Trade Program:** <https://ww2.arb.ca.gov/our-work/programs/cap-and-trade-program>
- **Beschreibung:** Umfassende Informationen zum kalifornischen Emissionshandelssystem, Berichte und Daten.
- **International Carbon Action Partnership (ICAP):** <https://icapcarbonaction.com/>
- **Beschreibung:** Eine globale Plattform für den Austausch von Wissen und Erfahrungen über Emissionshandelssysteme, bietet detaillierte Informationen zu ETS weltweit.
- **Climate Policy Radar:** <https://climatepolicydatabase.org/>
- **Beschreibung:** Eine Datenbank und Analyseplattform für Klimapolitiken weltweit, nützlich für vergleichende Studien.

D.4 Software/Tools für Emissionshandel und Analyse

- **R Project for Statistical Computing:** <https://www.r-project.org/>
- **Was es bietet:** Eine freie Softwareumgebung für statistische Berechnungen und Grafiken, mit zahlreichen Paketen für Ökonometrie und Zeitreihenanalyse (z.B. `plm`, `vars`, `did`).
- **Stata:** <https://www.stata.com/>
- **Was es bietet:** Eine leistungsstarke kommerzielle Statistiksoftware, die besonders für Paneldatenanalysen, DiD-Modelle und robuste Fehlerberechnungen in der ökonometrischen Forschung weit verbreitet ist.
- **Python (mit Pandas, NumPy, Statsmodels):** <https://www.python.org/>

- **Was es bietet:** Eine vielseitige Programmiersprache mit Bibliotheken für Datenmanipulation (**pandas**), numerische Berechnungen (**numpy**) und statistische Modellierung (**statsmodels**), ideal für maßgeschneiderte Analysen.

D.5 Professionelle Organisationen und Think Tanks

- **Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC):** <https://www.mcc-berlin.net/>
 - **Relevanz:** Führendes Forschungsinstitut im Bereich Klimawandel und globale Gemeinschaftsgüter, mit starkem Fokus auf Kohlenstoffpreismechanismen und deren Politikimplikationen.
 - **Agora Energiewende:** <https://www.agora-energiewende.de/>
 - **Relevanz:** Think Tank, der Strategien für die Energiewende entwickelt und Empfehlungen für eine kohlenstoffneutrale Wirtschaft gibt, oft mit Analysen zu CO2-Preisen.
 - **Carbon Market Watch:** <https://carbonmarketwatch.org/>
 - **Relevanz:** Eine NGO, die sich für die Integrität, Transparenz und Ambition von Kohlenstoffmärkten einsetzt und kritische Analysen zu deren Funktionsweise veröffentlicht.
-

Anhang E: Glossar der Begriffe

Dieser Glossar definiert wichtige technische Begriffe und domänenspezifisches Fachjargon, die in dieser Arbeit verwendet werden, um ein klares und einheitliches Verständnis zu gewährleisten.

Additionality (Zusätzlichkeit): Das Prinzip, dass Emissionsreduktionen oder -entnahmen aus einem Kohlenstoffprojekt nur dann als Offset anerkannt werden sollten, wenn sie ohne das Projekt nicht stattgefunden hätten.

Allowance (Emissionszertifikat): Ein handelbares Recht, eine bestimmte Menge Treibhausgase (in der Regel eine Tonne CO₂-Äquivalent) innerhalb eines Emissionshandelssystems zu emittieren.

Anthropogenic (Anthropogen): Verursacht oder beeinflusst durch menschliche Aktivitäten, insbesondere im Kontext von Umweltveränderungen wie dem Klimawandel.

Arbitrage: Die Ausnutzung von Preisunterschieden für dasselbe Gut an verschiedenen Märkten, um einen Gewinn zu erzielen. Im Emissionshandel kann dies grenzüberschreitend geschehen.

Baseline-Szenario: Ein Referenzszenario, das die Entwicklung von Emissionen oder anderen Variablen ohne eine spezifische Klimaschutzmaßnahme darstellt, um deren Wirkung bewerten zu können.

Benchmark: Ein Referenzwert oder Standard, der zur Leistungsbewertung oder zur Zuteilung von Emissionszertifikaten verwendet wird, oft basierend auf der besten verfügbaren Technologie.

Bioenergy with Carbon Capture and Storage (BECCS): Eine Technologie zur Kohlenstoffentnahme, bei der Biomasse zur Energiegewinnung verbrannt wird und das dabei freigesetzte CO₂ abgeschieden und gespeichert wird.

Cap-and-Trade-System: Ein marktbasierteres Instrument zur Emissionsminderung, bei dem eine Obergrenze (Cap) für die Gesamtemissionen festgelegt und handelbare Emissionszertifikate ausgegeben werden.

Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM): Ein Mechanismus, der darauf abzielt, importierte Waren mit einem CO2-Preis zu belegen, der den Kohlenstoffkosten im Inland entspricht, um Carbon Leakage zu verhindern.

Carbon Dioxide Equivalent (CO2e): Eine Maßeinheit, die die Klimawirksamkeit verschiedener Treibhausgase auf eine gemeinsame Basis (CO2) umrechnet, basierend auf ihrem Global Warming Potential (GWP).

Carbon Leakage (Kohlenstoffverlagerung): Die Verlagerung von Treibhausgasemissionen von einer Region mit strengen Klimaschutzauflagen in eine Region mit weniger strengen Auflagen, oft durch Produktionsverlagerung.

Carbon Offset (Kohlenstoffkompensation): Eine Emissionsreduktion oder -entnahme, die außerhalb des eigenen Betriebs eines Unternehmens stattfindet und zum Ausgleich eigener Emissionen gekauft werden kann.

Carbon Pricing (Kohlenstoffbepreisung): Die Zuweisung eines monetären Preises zu Kohlenstoffemissionen, um deren externe Kosten zu internalisieren und Anreize zur Reduktion zu schaffen.

Carbon Dioxide Removal (CDR): Technologien und Maßnahmen, die darauf abzielen, CO2 direkt aus der Atmosphäre zu entfernen und dauerhaft zu speichern (z.B. DAC, BECCS).

Clean Development Mechanism (CDM): Einer der flexiblen Mechanismen des Kyoto-Protokolls, der es Industrieländern ermöglichte, Emissionsminderungen in Entwicklungsländern durchzuführen und die resultierenden Zertifikate anzurechnen.

Command-and-Control-Ansätze: Direkte staatliche Regulierungen, die spezifische Verhaltensweisen vorschreiben oder verbieten (z.B. Emissionsgrenzwerte, Technologiesstandards).

Dekarbonisierung: Der Prozess der Reduzierung von Kohlenstoffemissionen, insbesondere CO₂, in der Wirtschaft und Gesellschaft, mit dem Ziel, eine kohlenstoffneutrale oder Netto-Null-Wirtschaft zu erreichen.

Difference-in-Differences (DiD): Eine ökonometrische Methode zur Schätzung kausaler Effekte einer Intervention, indem die Veränderung einer Behandlungsgruppe mit der einer Kontrollgruppe verglichen wird.

Direct Air Capture (DACP): Eine Technologie zur Kohlenstoffentnahme, die CO₂ direkt aus der Umgebungsluft filtert und konzentriert, um es anschließend zu speichern oder zu nutzen.

Emissionshandelssystem (ETS): Siehe Cap-and-Trade-System.

Endogenität: Ein Problem in der Ökonometrie, bei dem eine erklärende Variable (z.B. Kohlenstoffpreis) durch die abhängige Variable (z.B. Emissionen) oder eine ausgelassene Variable beeinflusst wird, was zu verzerrten Schätzungen führen kann.

Externalität: Eine Auswirkung der Produktion oder des Konsums eines Gutes auf Dritte, die nicht am Marktgeschehen beteiligt sind und für die diese Auswirkungen weder bezahlt noch entschädigt werden.

Greenwashing: Die Praxis von Unternehmen, sich als umweltfreundlicher darzustellen, als sie tatsächlich sind, oft durch irreführende Marketingaussagen oder den Kauf von fragwürdigen Offsets.

Global Warming Potential (GWP): Ein Maß für die relative Klimawirksamkeit eines Treibhausgases im Vergleich zu CO₂ über einen bestimmten Zeitraum (z.B. 100 Jahre).

Governance: Die Gesamtheit der Regeln, Institutionen und Prozesse, die zur Steuerung und Verwaltung eines Systems oder einer Organisation dienen, hier im Kontext von Kohlenstoffmärkten.

Just Transition (Gerechter Übergang): Ein Konzept, das die Notwendigkeit betont, die sozialen und wirtschaftlichen Auswirkungen des Übergangs zu einer kohlenstoffarmen Wirtschaft auf Arbeitnehmer und Gemeinden abzumildern.

Kointegration: Ein statistisches Phänomen in Zeitreihenanalysen, bei dem zwei oder mehr nicht-stationäre Zeitreihen eine langfristige Gleichgewichtsbeziehung zueinander aufweisen.

Kohlenstoffsenke: Ein natürliches oder künstliches Reservoir, das Kohlenstoff aus der Atmosphäre aufnimmt und speichert (z.B. Wälder, Ozeane, CCS-Anlagen).

Kohlenstoffsteuer: Eine Steuer, die auf jede Einheit von Kohlenstoffemissionen (meist pro Tonne CO₂e) erhoben wird, um deren externe Kosten zu internalisieren.

Linking (Verknüpfung): Die Verbindung zweier oder mehrerer Emissionshandelssysteme, die den Handel mit Zertifikaten über Systemgrenzen hinweg ermöglicht.

Marktstabilitätsreserve (MSR): Ein Mechanismus im EU ETS, der automatisch die Menge der zur Versteigerung stehenden Zertifikate anpasst, um Überschüsse zu steuern und die Preisstabilität zu fördern.

Marktversagen: Eine Situation, in der die freie Marktwirtschaft ohne staatliche Intervention nicht in der Lage ist, Ressourcen effizient zu allozieren, oft aufgrund von Externalitäten oder öffentlichen Gütern.

Monitoring, Reporting, Verification (MRV): Die Prozesse zur Überwachung, Berichterstattung und unabhängigen Verifizierung von Emissionen oder Emissionsreduktionen in Klimaschutzprogrammen.

Nationally Determined Contributions (NDCs): Die Klimaschutzbeiträge, die jedes Land im Rahmen des Pariser Abkommens freiwillig festlegt und regelmäßig aktualisiert.

Naturbasierte Lösungen (NbS): Maßnahmen, die natürliche Prozesse und Ökosysteme nutzen oder wiederherstellen, um gesellschaftliche Herausforderungen wie den Klimawandel zu bewältigen (z.B. Aufforstung).

Paneldatenanalyse: Eine statistische Methode, die Daten über mehrere Einheiten (z.B. Länder, Unternehmen) und Zeitpunkte hinweg analysiert, um sowohl zeitliche als auch querschnittliche Effekte zu erfassen.

Permanenz: Die Eigenschaft von Kohlenstoffentnahmen oder -speicherungen, dauerhaft zu sein und nicht wieder in die Atmosphäre freigesetzt zu werden, eine wichtige Anforderung für Offsets.

Pigou-Steuer: Eine Steuer, die auf Aktivitäten erhoben wird, die negative Externalitäten verursachen, um deren soziale Kosten zu internalisieren.

Preiselastizität: Ein Maß dafür, wie stark die Nachfrage nach einem Gut auf eine Preisänderung reagiert. Im Kontext von CO2-Emissionen, wie stark Emissionen auf einen Kohlenstoffpreis reagieren.

Preisvolatilität: Die Tendenz des Preises eines Gutes oder einer Anlage, stark und unvorhersehbar zu schwanken, hier bezogen auf den Preis von Emissionszertifikaten.

Tokenisierung: Der Prozess, reale Vermögenswerte (hier Emissionszertifikate) in digitale Token auf einer Blockchain umzuwandeln, um deren Handel und Verwaltung zu erleichtern.

Vektorautoregressionsmodell (VAR): Ein ökonometrisches Modell, das die dynamischen Wechselwirkungen zwischen mehreren Zeitreihenvariablen untersucht, indem jede Variable durch ihre eigenen vergangenen Werte und die vergangenen Werte der anderen Variablen erklärt wird.

References

Asadnabizadeh, & Moe. (2024). A review of Global Carbon Markets from Kyoto to Paris and beyond: the persistent failure of implementation. *Frontiers in Environmental Science*. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1368105>.

Bae. (2018). Impacts of Income Inequality on CO2 Emission under Different Climate Change Mitigation Policies. **. <https://www.semanticscholar.org/paper/1b9b0d9d24e7e112db3fc010c91d49d5d21b5868>.

Bazelmans. (2008). Linking the EU ETS to Other Emissions Trading Schemes. **.
<https://doi.org/10.4337/9781848446038.00019>.

Bello. (2024). Carbon Pricing Policy and Energy Efficiency in Canadian Provinces: A Policy Brief. *ASEAN Journal of Psychiatry*. <https://doi.org/10.54615/2231-7805.1000394>.

Bertram, Luderer, Pietzcker, Kriegler, & Edenhofer. (2014). Mitigating the climate action GAP with technology policies.. **. <https://www.semanticscholar.org/paper/1d172ce9bf0659185cdb809a9e3c3af99af2dd1c>.

Chapatuka. (2025). Mobilizing Domestic Resources for Climate Change Finance through Tax Policy in Developing Countries: A Literature Review. *International Journal For Multidisciplinary Research*. <https://doi.org/10.36948/ijfmr.2025.v07i04.54192>.

Chen. (2024). Path Analysis of The Carbon Market's Impact on Corporate Carbon Emission Reduction. *Highlights in Business, Economics and Management*. <https://doi.org/10.54097/a7jeqk60>.

Cheng, & Jiang. (2024). How can carbon markets drive the development of renewable energy sector? Empirical evidence from China. *Data Science in Finance and Economics*. <https://doi.org/10.3934/dsfe.2024010>.

Conrad, & Wang. (1995). *CO₂ Zertifikate oder CO₂ Steuern: Wirkungsweise und Kostenbelastung der Industrien — eine AGE-Analyse für Deutschland (West)*. Gabler Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-663-02128-5_4

Digitemie, & Ekemezie. (2024). Assessing the role of carbon pricing in global climate change mitigation strategies. *Magna Scientia Advanced Research and Reviews*. <https://doi.org/10.30574/msarr.2024.10.2.0040>.

Döbbeling-Hildebrandt, Miersch, Khanna, Bachelet, Bruns, Callaghan, Edenhofer, Flachsland, Forster, Kalkuhl, Koch, Lamb, Ohlendorf, Steckel, & Minx. (2024). Systematic review and meta-analysis of ex-post evaluations on the effectiveness of carbon pricing. *Nature Communications*. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-48512-w>.

Ekardt, & Hennig. (2011). Möglichkeiten und Grenzen der Mengensteuerung in der Landnutzung – Landnutzung, Klimawandel und Emissionshandel. **. <https://doi.org/10.5771/9783845233321-171>.

Emeka-Okoli, Otonnah, Nwankwo, & Nwankwo. (2024). REVIEW OF CARBON PRICING MECHANISMS: EFFECTIVENESS AND POLICY IMPLICATIONS. *International journal of applied research in social sciences*. <https://doi.org/10.51594/ijarss.v6i3.891>.

Harris, & McCarthy. (2023). A just transition to what, for whom, and by what means? Transition technology, carbon markets, and an Appalachian coal mine. *Energy Research & Social Science*. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.103307>.

Herman. (2024). Intermediaries and complexity: assessing emissions-based governance in the European Union's EU-ETS. *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics*. <https://doi.org/10.1007/s10784-024-09651-z>.

Houballah, Courtonne, Cuny, Colin, Fortin, Pichancourt, & Colin. (2024). The aftermath of the Covid pandemic in the forest sector: new opportunities for emerging wood products. **. <https://www.semanticscholar.org/paper/401a44b081861cdab7c2b43754ee92d24e839d34>.

Jain, Parikh, Jawale, & Pawar. (2024). Empowering India's Climate Action: Harnessing Blockchain for Carbon Trading. <https://doi.org/10.1109/ICBDS61829.2024.10837382>

Klimko, & Hasprová. (2025). The impact of the EU ETS on greenhouse gas emissions in the EU from 2005 to 2022. *Economics and Environment*. <https://doi.org/10.34659/eis.2025.92.1.874>.

Kreis-Hoyer. (2000). *Zertifikate im Klimaschutz*. Deutscher Universitätsverlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-663-07921-7>

Liang, Goodell, & Li. (2024). Impacts of carbon market and climate policy uncertainties on financial stability: Evidence from connectedness network analysis. *Journal of international financial markets, institutions, and money*. <https://doi.org/10.1016/j.intfin.2024.101977>.

Luo, & Lim. (2024). An empirical analysis on emissions reduction effect and main reduction drivers of China's carbon emissions trading pilot. *Journal of Climate Change Research*. <https://doi.org/10.15531/ksccr.2024.15.1.111>.

Macintosh, Butler, Larraondo, Evans, Ansell, Waschka, Fensham, Eldridge, Lindenmayer, Gibbons, & Summerfield. (2024). Australian human-induced native forest regeneration carbon offset projects have limited impact on changes in woody vegetation cover and carbon removals. *Communications Earth & Environment*. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01313-x>.

Merlo, Mendonça, Santos, Carvalho, Guerra, & Brandão. (2025). Blockchain for the carbon market: a literature review. *Discover Environment*. <https://doi.org/10.1007/s44274-025-00260-4>.

Mineshima, Mylonas, Parry, & Prihardini. (2021). Scaling up Climate Mitigation Policy in Germany, WP/21/241, September 2021. **. <https://www.semanticscholar.org/paper/3840a350897e20962dafdc4f4b8e68e060c7d24d>.

Perino, & Willner. (2016). Procrastinating reform: The impact of the market stability reserve on the EU ETS. **. <https://doi.org/10.1016/J.JEEM.2016.09.006>.

Skopek. (2010). Uncommon Goods: On Environmental Virtues and Voluntary Carbon Offsets. **. <https://www.semanticscholar.org/paper/92c5d1f6168b3050e30e809a9e3c3af99af2dd1c>.

Sommer. (2015). Beurteilung der Wirksamkeit des bisherigen Klimaschutz-Engagements. **. https://doi.org/10.1007/978-3-658-07952-9_5.

Su, Pang, Qin, Lobont, & Umar. (2023). The spillover effects among fossil fuel, renewables and carbon markets: Evidence under the dual dilemma of climate change and energy crises. *Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127304>.

Thamrin, Nasution, & Nuryadin. (2025). Carbon tax policy in achieving Indonesia's nationally determined contribution target year 2030. *IOP Conference Series: Earth and Environment*. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1445/1/012036>.

Tyagi, & Haritash. (2024). Climate-smart agriculture, enhanced agroproduction, and carbon sequestration potential of agroecosystems in India: a meta-analysis. *Journal of Environmental Studies and Sciences*. <https://doi.org/10.1007/s13412-024-00917-1>.

Violet George. (2023). *McKinsey Believes Carbon Removals To Be A Trillion Dollar Market Opportunity*. <https://carbonherald.com/mckinsey-believes-carbon-removals-to-be-a-trillion-dollar-market-opportunity/>

Wang, Wang, Yunis, & Kchouri. (2023). Spillovers and connectedness among climate policy uncertainty, energy, green bond and carbon markets: A global perspective. *Energy Economics*. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.107170>.

Winkler, Marquard, & Jooste. (2010). Putting a price on carbon: economic instruments to mitigate climate change in South Africa and other developing countries. **. <https://www.semanticscholar.org/paper/651e75a16fd81d25d844743ad4639cbfe511e05>.

Xiong. (2024). A Nonlinear Analysis of Carbon Pricing Mechanisms: Comparing the Economic Impacts of Carbon Tax and Emissions Trading Schemes in Developing Economies. *Communications on Applied Nonlinear Analysis*. <https://doi.org/10.52783/cana.v32.1903>.

Yliheljo. (2021). The Variable Nature of Ownership of Emission Units in the Intersection of Climate Law, Property Law, and the Regulation of Financial Markets. **. <https://doi.org/10.1163/18786561-11010002>.

Yu, Wang, Liang, Liu, & Wang. (2022). Carbon market volatility analysis based on structural breaks: Evidence from EU-ETS and China. *Frontiers in Environmental Science*. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.973855>.

Zhang, Luo, Wu, & Li. (2024). Study on the effectiveness and influencing factors of china's carbon emissions trading policy from industries' perspective. *Clean Technologies and Environmental Policy*. <https://doi.org/10.1007/s10098-024-02817-y>.