

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

KI-generierte akademische Arbeit als Showcase

Academic Thesis AI (Multi-Agenten-System)

Januar 2025

Table of Contents

| | |
|---|----|
| Abstract | 1 |
| Einleitung | 3 |
| Literaturübersicht | 4 |
| 2.1 Historische Entwicklung und globale Rahmenwerke des Emissionshandels | 5 |
| 2.1.1 Die Anfänge: Das Kyoto-Protokoll und seine Mechanismen. | 5 |
| 2.1.2 Die Europäische Union als Vorreiter: Das EU-Emissionshandelssystem (EU ETS). | 7 |
| 2.1.3 Globale Ausbreitung und Diversifizierung von ETS. | 9 |
| 2.1.4 Vergleich der Designmerkmale von Emissionshandelssystemen | 10 |
| 2.2 Theoretische Fundamente der Umweltökonomie und Kohlenstoffpreisgestaltung | 12 |
| 2.2.1 Ökonomische Instrumente zur Umweltregulierung: Pigou und Coase. . | 12 |
| 2.2.2 Marktbasierte Instrumente: Steuern versus Zertifikate. | 13 |
| 2.2.3 Allokationsfragen und Verteilungswirkungen. | 15 |
| 2.3 CO ₂ -Preismechanismen als Instrumente des Klimaschutzes | 16 |
| 2.3.1 Funktionsweise und Ziele der Kohlenstoffpreisgestaltung. | 16 |
| 2.3.2 Implementierung von Kohlenstoffpreisen in verschiedenen Sektoren. . | 18 |
| 2.3.3 Die Rolle von Kohlenstoffmärkten in der globalen Klimapolitik. | 19 |
| 2.4 Empirische Evidenz zur Wirksamkeit von Emissionshandelssystemen und Kohlen- stoffpreisen | 20 |
| 2.4.1 Analysen der Emissionsreduktion. | 21 |
| 2.4.2 Auswirkungen auf Wirtschaft und Innovation. | 22 |
| 2.4.3 Sektorale und regionale Fallstudien. | 23 |
| 2.5 Kritische Perspektiven, Herausforderungen und zukünftige Entwicklungen . . . | 25 |
| 2.5.1 Systemische Schwächen und Designfehler. | 25 |
| 2.5.2 Soziale Gerechtigkeit und Verteilungswirkungen. | 26 |
| 2.5.3 Die Zukunft der Kohlenstoffpreisgestaltung. | 27 |

| | |
|---|----|
| Methodik | 29 |
| Analyserahmen für Klimaschutzwirkung | 30 |
| Auswahlkriterien für Fallstudien | 32 |
| Datenquellen und Messverfahren | 34 |
| Abbildung 1: Konzeptuelles Rahmenwerk zur Bewertung der ETS-Wirkung . | 36 |
| Statistische Methoden zur Wirksamkeitsanalyse | 38 |
| Analyse | 40 |
| Emissionsreduktionen durch CO ₂ -Handel | 41 |
| Abbildung 2: Prozessfluss des Emissionshandels (vereinfacht) | 44 |
| Preisgestaltung und Marktmechanismen | 45 |
| Fallstudien | 48 |
| Vergleich mit anderen Klimaschutzinstrumenten | 51 |
| Empirische Belege für Klimaschutzwirkung | 54 |
| Tabelle 2: Emissionsreduktion im EU ETS (Ausgewählte Sektoren 2005-2022) | 55 |
| Tabelle 3: Vergleich der Effekte von CO ₂ -Bepreisungsinstrumenten | 58 |
| Diskussion | 59 |
| Implikationen für die Klimapolitik | 60 |
| Grenzen und Herausforderungen des Emissionshandels | 62 |
| Verbesserungsvorschläge für CO ₂ -Märkte | 63 |
| Rolle im globalen Klimaschutz | 66 |
| Empfehlungen für Politik und Wirtschaft | 67 |
| Einschränkungen | 70 |
| Methodische Einschränkungen | 70 |
| Umfang und Generalisierbarkeit | 70 |
| Zeitliche und kontextuelle Beschränkungen | 71 |
| Theoretische und konzeptionelle Einschränkungen | 72 |
| Zukünftige Forschungsrichtungen | 72 |

| | |
|--|----|
| 1. Empirische Validierung und großflächige Tests | 72 |
| 2. Sektorale Ausweitung und Integration | 73 |
| 3. Internationale Kooperation und Verknüpfung von Märkten | 73 |
| 4. Soziale Gerechtigkeit und Verteilungswirkungen | 74 |
| 5. Technologische Innovation und Negative Emissionstechnologien | 74 |
| 6. Rolle der Finanzmärkte und Preisstabilität | 75 |
| 7. Wechselwirkungen mit anderen Klimaschutzinstrumenten | 75 |
| Fazit | 75 |
| Hauptergebnisse zur Klimaschutzwirkung | 76 |
| Beitrag zum Verständnis des Emissionshandels | 78 |
| Zukünftige Forschungsrichtungen | 79 |
| Anhang A: Rahmenwerk zur Bewertung der Klimaschutzwirkung von Emissionshandelssystemen | 81 |
| A.1 Theoretische Grundlagen | 81 |
| A.2 Modellierung der Kausalität | 82 |
| A.3 Anwendungsbereiche | 83 |
| A.4 Validierungskriterien | 84 |
| Anhang C: Detaillierte Fallstudien-Projektionen und Metriken | 84 |
| C.1 EU ETS: Szenarioanalyse der Emissionsreduktion | 85 |
| C.2 Kalifornisches Cap-and-Trade: Ökonomische Metriken | 85 |
| C.3 Cross-Szenario-Vergleich der CO ₂ -Preisentwicklung | 86 |
| Anhang D: Zusätzliche Referenzen und Ressourcen | 88 |
| D.1 Grundlagentexte | 88 |
| D.2 Aktuelle Forschungspapiere | 88 |
| D.3 Online-Ressourcen | 89 |
| D.4 Software/Tools | 90 |
| D.5 Professionelle Organisationen | 90 |

| | |
|--------------------------------|----|
| Anhang E: Glossar der Begriffe | 91 |
| References | 94 |

Abstract

Forschungsproblem und Ansatz: Der Klimawandel, primär durch anthropogene Treibhausgasemissionen verursacht, stellt eine der drängendsten globalen Herausforderungen dar, deren Bewältigung wirksame politische Instrumente erfordert. Diese Arbeit untersucht, ob der Handel mit CO₂-Zertifikaten nachweislich zu einer signifikanten Verlangsamung des menschengemachten Klimawandels führt, indem sie die Effektivität und Effizienz dieses markt-basierten Ansatzes analysiert.

Methodik und Ergebnisse: Mittels einer umfassenden Literaturübersicht und detaillierter Fallstudien des EU ETS, des kalifornischen Cap-and-Trade-Programms und des chinesischen nationalen ETS werden die Mechanismen der Emissionsreduktion, die Preisgestaltung und Marktmechanismen sowie die ökonomischen und sozialen Auswirkungen evaluiert. Die Ergebnisse bestätigen, dass gut konzipierte Emissionshandelssysteme signifikante Emissionsreduktionen bewirken und Innovationen fördern können, jedoch mit Herausforderungen wie Preisvolatilität und Carbon Leakage verbunden sind.

Wesentliche Beiträge: Die Arbeit leistet drei primäre Beiträge: (1) Sie synthetisiert den aktuellen Forschungsstand zur Wirksamkeit von CO₂-Märkten und identifiziert Best Practices, (2) sie beleuchtet die komplexen Interaktionen zwischen Emissionshandel, anderen Klimaschutzinstrumenten und makroökonomischen Faktoren, und (3) sie formuliert konkrete Empfehlungen für Politik und Wirtschaft zur Optimierung und Weiterentwicklung von CO₂-Märkten.

Implikationen: Die gewonnenen Erkenntnisse sind entscheidend für eine evidenzbasierte Klimapolitikgestaltung, die nicht nur ökologische Ziele verfolgt, sondern auch ökonomische Effizienz und soziale Gerechtigkeit berücksichtigt. Sie unterstreichen die Rolle des Emissionshandels als unverzichtbaren Bestandteil eines umfassenden Policy-Mixes und bieten Ansätze zur Stärkung seiner globalen Wirkung.

Keywords: Emissionshandel, CO2-Zertifikate, Klimawandel, Klimapolitik, EU ETS, Cap-and-Trade, Carbon Leakage, Marktstabilitätsreserve, Dekarbonisierung, Umweltökonomie, Preissignal, Innovation, Emissionsreduktion, soziale Gerechtigkeit, Pariser Abkommen

Einleitung

Der Klimawandel ist eine der größten und komplexesten Herausforderungen unserer Zeit (Achakulwisut et al., 2023). Seine Auswirkungen? Sie sind bereits heute unübersehbar: steigende globale Durchschnittstemperaturen, extreme Wetterereignisse, schmelzende Gletscher und Polkappen sowie ein kontinuierlicher Anstieg des Meeresspiegels. Der wissenschaftliche Konsens ist unmissverständlich: Menschliche Aktivitäten, besonders die Freisetzung von Treibhausgasen wie Kohlendioxid (CO₂), Methan und Lachgas, treiben diese Veränderungen voran (Achakulwisut et al., 2023). Die Notwendigkeit, globale Emissionen drastisch zu reduzieren, wird durch internationale Abkommen wie das Pariser Abkommen unterstrichen (Asadnabizadeh, 2024). Dessen Ziel ist es, die globale Erwärmung auf deutlich unter 2°C über dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen und im besten Fall sogar auf 1,5°C zu beschränken. Dieses ehrgeizige Ziel verlangt eine tiefgreifende Transformation: Wir müssen weg von fossilen Brennstoffen und hin zu nachhaltigen Alternativen (Achakulwisut et al., 2023). Das betrifft globale Energiesysteme ebenso wie Industrieprozesse, die Landwirtschaft und den gesamten Transportsektor.

Doch diese Mammutaufgabe lässt sich nicht allein durch technologische Innovationen und Verhaltensänderungen lösen. Es braucht auch robuste und vor allem effektive politische Instrumente, die Anreize für emissionsmindernde Maßnahmen schaffen. Gerade hier erweisen sich marktbasierter Instrumente, allen voran die CO₂-Bepreisung, als vielversprechender Ansatz (Timilsina, 2018)(Digitemie & Ekemezie, 2024). Sie internalisieren die externen Kosten von Emissionen und fördern so eine effiziente Reduktion. Konkret verleiht die CO₂-Bepreisung den Emissionen einen Preis, der die gesellschaftlichen Kosten des Klimawandels widerspiegelt (Timilsina, 2018). So werden Unternehmen und Konsumenten motiviert, ihre Emissionen zu reduzieren. Grundsätzlich gibt es zwei Hauptformen der CO₂-Bepreisung: die CO₂-Steuer und den Emissionshandel (Timilsina, 2018). Eine CO₂-Steuer legt dabei einen festen Preis pro Tonne CO₂ fest. Im Gegensatz dazu setzt der Emissionshandel eine

Obergrenze für die Gesamtmenge der Emissionen und lässt den Preis flexibel durch den Markt bestimmen.

Literaturübersicht

Die globale Klimakrise stellt eine der drängendsten Herausforderungen des 21. Jahrhunderts dar, die tiefgreifende Transformationen in Wirtschaft und Gesellschaft erfordert (Achakulwisut et al., 2023). Um die ambitionierten Ziele des Pariser Abkommens zu erreichen und die globale Erwärmung auf deutlich unter 2 Grad Celsius gegenüber vorindustriellen Werten zu begrenzen, sind koordinierte und wirksame politische Maßnahmen unerlässlich (Asadnabizadeh, 2024). Unter den verschiedenen Ansätzen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen haben sich marktbaserte Instrumente, insbesondere die Kohlenstoffpreisgestaltung und Emissionshandelssysteme (ETS), als zentrale Säulen der Klimapolitik etabliert (Timilsina, 2018)(Digitemie & Ekemezie, 2024). Diese Instrumente zielen darauf ab, den externen Kosten von CO₂-Emissionen einen monetären Wert beizumessen, wodurch Anreize für Emittenten geschaffen werden, ihre Emissionen zu reduzieren, in kohlenstoffarme Technologien zu investieren und so einen effizienten Übergang zu einer nachhaltigeren Wirtschaft zu fördern (Scotti et al., 2024)(Chen et al., 2024). Die vorliegende Literaturübersicht beleuchtet die historische Entwicklung, die theoretischen Grundlagen, die Funktionsweise, die empirische Evidenz sowie kritische Perspektiven und zukünftige Herausforderungen im Kontext der Kohlenstoffpreisgestaltung und von Emissionshandelssystemen. Sie dient dazu, den aktuellen Forschungsstand zu synthetisieren und die Relevanz dieser Instrumente für die globale Klimaschutzagenda herauszuarbeiten. Die Analyse umfasst sowohl internationale Abkommen als auch regionale Implementierungen, um ein umfassendes Bild der Wirksamkeit und Limitationen dieser Politikansätze zu zeichnen.

2.1 Historische Entwicklung und globale Rahmenwerke des Emissionshandels

Die Idee, Umweltgütern einen Preis zuzuweisen, um deren Nutzung zu steuern, ist nicht neu, doch ihre konkrete Umsetzung im Kontext des Klimaschutzes hat eine vergleichsweise junge, aber dynamische Geschichte. Die Entwicklung von Emissionshandelssystemen ist eng mit internationalen Klimaschutzbemühungen verknüpft und hat sich von anfänglichen Konzepten zu komplexen und weitreichenden Mechanismen entwickelt, die heute einen wesentlichen Bestandteil der globalen Klimapolitik bilden. Diese historische Reise ist geprägt von politischen Verhandlungen, ökonomischen Überlegungen und der kontinuierlichen Anpassung an neue wissenschaftliche Erkenntnisse und gesellschaftliche Anforderungen.

2.1.1 Die Anfänge: Das Kyoto-Protokoll und seine Mechanismen.

Die Wurzeln des internationalen Emissionshandels liegen im Kyoto-Protokoll, das 1997 unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (UNFCCC) verabschiedet wurde und 2005 in Kraft trat. Als erstes völkerrechtlich verbindliches Abkommen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen setzte das Kyoto-Protokoll für Industrieländer (Anhang I-Staaten) quantitative Emissionsziele fest (Kemfert, 2005). Um diesen Zielen flexibel und kosteneffizient begegnen zu können, etablierte das Protokoll drei sogenannte “flexible Mechanismen”: den Emissionshandel (Emissions Trading, ET), die Gemeinsame Umsetzung (Joint Implementation, JI) und den Mechanismus für umweltverträgliche Entwicklung (Clean Development Mechanism, CDM) (Chaturvedi, 2012).

Der Emissionshandel nach Artikel 17 des Kyoto-Protokolls erlaubte es Anhang I-Staaten, Emissionsrechte untereinander zu handeln, wenn ein Land seine Zielvorgabe übererfüllte und ein anderes Land seine Zielvorgabe nicht erreichen konnte. Dies sollte zu einer Reduzierung der Gesamtemissionen zu den geringstmöglichen Kosten führen, indem Emissionsminderungen dort vorgenommen wurden, wo sie am günstigsten waren. Die Idee war,

dass Länder mit hohen Grenzkosten der Emissionsreduktion Zertifikate von Ländern mit niedrigeren Grenzkosten kaufen würden, was die globale Effizienz maximiert (Kautnek, 2012).

Der CDM nach Artikel 12 ermöglichte es Industrieländern, Emissionsreduktionsgutschriften (Certified Emission Reductions, CERs) aus Investitionen in Klimaschutzprojekte in Entwicklungsländern zu generieren. Diese Projekte mussten nachweislich zusätzliche Emissionsminderungen bewirken, die ohne die Investition nicht zustande gekommen wären. Der CDM sollte nicht nur zur Erreichung der Reduktionsziele der Industrieländer beitragen, sondern auch eine nachhaltige Entwicklung in den Gastländern fördern. Trotz seines innovativen Ansatzes wurde der CDM mit Kritik konfrontiert, insbesondere hinsichtlich der Additionality-Nachweisführung, der Gefahr des “Carbon Leakage” und der Verteilungsgerechtigkeit (Bubna-Litic & Chalifour, 2012). Die Verwaltung und Validierung von Projekten war zudem komplex und bürokratisch, was die Skalierung erschwerte.

Die Gemeinsame Umsetzung (JI) nach Artikel 6 ähnelte dem CDM, bezog sich jedoch auf Projekte zwischen Anhang I-Staaten. Hier konnten Emissionsreduktionseinheiten (ERUs) durch Investitionen in Emissionsminderungsprojekte in anderen Industrieländern generiert werden, typischerweise in Ländern mit Transformationswirtschaften, wo oft noch “Low-Hanging Fruits” für kostengünstige Reduktionen existierten. Auch hier war das Ziel, die Gesamtkosten der Emissionsminderung zu senken und gleichzeitig Technologietransfer zu fördern.

Die Erfahrungen mit den flexiblen Mechanismen des Kyoto-Protokolls waren gemischt. Einerseits zeigten sie das Potenzial marktbasierter Instrumente zur Mobilisierung von Investitionen und zur Steigerung der Kosteneffizienz im Klimaschutz. Andererseits offenbarten sie auch erhebliche Designschwächen, Governance-Probleme und die Notwendigkeit robuster Überwachungs-, Berichts- und Verifizierungssysteme (MRV). Die politische Fragmentierung und das Scheitern großer Emittenten wie den USA, das Protokoll zu ratifizieren, begrenzten zudem die globale Reichweite und Wirksamkeit (Kemfert, 2005). Dennoch legten die Mechanismen des Kyoto-Protokolls den Grundstein für nachfolgende, ambitioniertere Emis-

sionshandelssysteme weltweit und lieferten wertvolle Lektionen für deren Gestaltung (Chan, 2009).

2.1.2 Die Europäische Union als Vorreiter: Das EU-Emissionshandelssystem (EU ETS).

Aufbauend auf den Erfahrungen und der Vision des Kyoto-Protokolls etablierte die Europäische Union 2005 ihr eigenes Emissionshandelssystem (EU ETS), das bis heute der größte und liquideste Kohlenstoffmarkt der Welt ist (Bode, 2005)(Beydemir, 2016). Das EU ETS war das erste multinationale Cap-and-Trade-System und deckt derzeit etwa 40 % der Treibhausgasemissionen der EU ab, darunter Emissionen aus der Stromerzeugung, energieintensiven Industrien sowie ab 2012 auch dem inner-europäischen Luftverkehr und ab 2024 dem Seeverkehr (Wang, 2023). Das System wurde in mehreren Phasen entwickelt und angepasst, um auf Herausforderungen zu reagieren und seine Wirksamkeit zu steigern.

Phase I (2005-2007): Die Lernphase. Diese Pilotphase diente dazu, Erfahrungen zu sammeln und die notwendige Infrastruktur aufzubauen. Die Zuteilung der Emissionszertifikate erfolgte primär kostenfrei durch nationalen Allokationspläne (NAPs), was oft zu einer Überallokation führte. Dies, gepaart mit dem Fehlen eines einheitlichen Caps und unzureichenden Sanktionen, führte zu einem starken Preisverfall der Zertifikate gegen Ende der Phase (Bode, 2005). Trotz dieser Mängel bewies die Phase I, dass ein grenzüberschreitender Emissionshandel technisch und administrativ umsetzbar ist.

Phase II (2008-2012): Die Kyoto-Verpflichtungsphase. Diese Phase fiel mit der ersten Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls zusammen. Die Zuteilung erfolgte weiterhin hauptsächlich kostenfrei, aber mit strenger Caps. Die Wirtschaftskrise von 2008 führte jedoch erneut zu einem erheblichen Überschuss an Zertifikaten und einem anhaltend niedrigen Kohlenstoffpreis, was die Anreizwirkung für Emissionsminderungen schwächte (Vallés et al., 2012). In dieser Phase wurden auch erste Bemühungen unternommen, die Zuteilungsregeln zu harmonisieren (Ochsenreiher & Zirkel, 2014).

Phase III (2013-2020): Reformen und Zentralisierung. Als Reaktion auf die Probleme der Überallokation und der Preisvolatilität wurden in Phase III umfassende Reformen eingeführt. Die kostenlose Zuteilung wurde schrittweise durch Auktionen ersetzt, wodurch der Marktmechanismus gestärkt und Einnahmen für Mitgliedstaaten generiert wurden. Das Cap wurde EU-weit zentral festgelegt und jährlich um 1,74 % reduziert. Zudem wurde ein Mechanismus zur Rückhaltung von Zertifikaten im Falle eines Überangebots eingeführt, um die Marktstabilität zu erhöhen (Rojek-Wöckner, 2017). Trotz dieser Verbesserungen blieb der Zertifikatsüberschuss eine Herausforderung, was die Entwicklung weiterer Maßnahmen zur Marktstabilisierung erforderlich machte.

Phase IV (2021-2030): Ambition und Marktstabilitätsreserve (MSR). Die aktuelle Phase des EU ETS ist geprägt von erhöhten Klimazielen, die im Rahmen des Europäischen Green Deals festgelegt wurden. Das jährliche Cap wird nun um 2,2 % reduziert, und die Marktstabilitätsreserve (MSR), die 2019 in Kraft trat, spielt eine entscheidende Rolle bei der Adressierung des strukturellen Überschusses an Zertifikaten (Liu et al., 2024). Die MSR passt die Menge der zur Versteigerung stehenden Zertifikate automatisch an das Marktangebot an und hat maßgeblich zur Erholung und Stabilisierung der CO2-Preise beigetragen. Zudem wurde das EU ETS auf neue Sektoren wie den Seeverkehr ausgeweitet (Wang, 2023) und es gibt Pläne für ein separates ETS für Gebäude und Straßenverkehr. Empirische Studien haben gezeigt, dass das EU ETS einen messbaren Einfluss auf die Reduktion von Treibhausgasemissionen hatte (Beydemir, 2016)(Klimko & Hasprová, 2025) und Innovationen im Bereich kohlenstoffarmer Technologien förderte (Chen et al., 2024). Dennoch bestehen weiterhin Herausforderungen hinsichtlich der langfristigen Preisstabilität, des Risikos der Carbon Leakage und der Notwendigkeit einer kontinuierlichen Anpassung an ambitioniertere Klimaziele.

2.1.3 Globale Ausbreitung und Diversifizierung von ETS.

Der Erfolg und die Erfahrungen des EU ETS haben zahlreiche andere Jurisdiktionen weltweit dazu inspiriert, eigene Emissionshandelssysteme zu entwickeln und zu implementieren. Heute existieren über 30 operationelle ETS auf nationaler oder subnationaler Ebene, die zusammen einen erheblichen Anteil der globalen Emissionen abdecken. Diese Systeme variieren stark in ihrem Design, ihrer Abdeckung, ihren Zuteilungsmechanismen und ihren Preiskorridoren, doch alle verfolgen das grundlegende Ziel, einen Preis für Kohlenstoffemissionen zu schaffen.

Ein prominentes Beispiel ist das chinesische Nationale Emissionshandelssystem, das 2021 offiziell gestartet wurde und das weltweit größte ETS in Bezug auf die abgedeckten Emissionen ist (Zeng et al., 2018). China hatte bereits seit 2013 regionale Pilot-ETS implementiert (Cui et al., 2021)(Wang, 2024), deren Erfahrungen in die Gestaltung des nationalen Systems einflossen. Das chinesische ETS konzentriert sich zunächst auf den Stromsektor, mit Plänen zur schrittweisen Ausweitung auf weitere Sektoren. Studien zur Wirksamkeit der chinesischen Pilotmärkte deuten auf positive Effekte bei der Emissionsreduktion und der Förderung technologischer Innovationen hin (Cui et al., 2021)(Wang, 2024).

Weitere wichtige ETS finden sich in Nordamerika, darunter das California Cap-and-Trade Program und die Regional Greenhouse Gas Initiative (RGGI) im Nordosten der USA, sowie in Kanada. Auch in Asien haben Südkorea, Japan und Neuseeland eigene Systeme eingeführt. Diese Systeme zeigen eine große Vielfalt an Ansätzen. Beispielsweise verwenden einige Systeme feste Preiskorridore oder Mechanismen zur Preisstabilisierung, während andere reine Mengenkontrollen bevorzugen.

Die Idee der Verknüpfung von Emissionshandelssystemen (“linking”) hat ebenfalls an Bedeutung gewonnen. Ein Linking würde es Unternehmen in verschiedenen Jurisdiktionen ermöglichen, Emissionszertifikate über Systemgrenzen hinweg zu handeln, was zu einer Erweiterung des Marktes, einer Erhöhung der Liquidität und potenziell zu einer weiteren Steigerung der Kosteneffizienz führen könnte (Oliveira et al., 2020). Das Internationale

Carbon Action Partnership (ICAP), eine internationale Organisation, die Regierungen und Behörden zusammenbringt, die Emissionshandelssysteme betreiben oder planen, fördert den Wissensaustausch und die Zusammenarbeit in diesem Bereich (Bergfelder, 2008). Trotz der potenziellen Vorteile stellen Fragen der Governance, der Harmonisierung von Regeln und der Souveränität weiterhin Herausforderungen für die umfassende Verknüpfung dar (Oliveira et al., 2020). Die globale Ausbreitung und Diversifizierung von ETS unterstreicht jedoch die wachsende Anerkennung der Kohlenstoffpreisgestaltung als ein effektives Instrument im globalen Kampf gegen den Klimawandel.

2.1.4 Vergleich der Designmerkmale von Emissionshandelssystemen

Die Vielfalt der globalen Emissionshandelssysteme spiegelt unterschiedliche politische Prioritäten, ökonomische Kontexte und Lernkurven wider. Ein Vergleich ihrer Designmerkmale ist entscheidend, um die Stärken und Schwächen der einzelnen Ansätze zu verstehen und Best Practices für zukünftige Implementierungen zu identifizieren. Die folgende Tabelle fasst die wesentlichen Designelemente der besprochenen ETS zusammen:

Tabelle 1: Vergleich der Designmerkmale ausgewählter Emissionshandelssysteme

| Merkmal | EU ETS (Phase IV) | Kalifornisches Cap-and-Trade | Chinesisches Nationales ETS |
|-------------------------------|---|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Startjahr | 2005 (Phase I) | 2013 | 2021 (national) |
| Abdeckung (Sektoren) | Energie, Industrie, Luftfahrt, Seeverkehr | Energie, Industrie, Transport, Erdgas | Energie (geplant: Stahl, Zement) |
| Abdeckung (Emissionen) | ca. 40% der EU-Emissionen | ca. 85% der Staats-Emissionen | ca. 40% der nationalen CO2-Emissionen |

| Merkmal | EU ETS (Phase IV) | Kalifornisches Cap-and-Trade | Chinesisches Nationales ETS |
|----------------------------|--|--|---|
| Zuteilung | Auktionierung (dominant), kostenlose Zuteilung für Carbon Leakage Sektoren | Auktionierung, kostenlose Zuteilung, Offsets | Überwiegend kostenlose Zuteilung (Benchmarking) |
| Cap-Reduktion | Jährlich 2,2% | Jährlich 3-4% | Intensitätsbasiert (flexibler) |
| Preisstabilisierung | Marktstabilitätsreserven (MSR) | Preisunter- und -obergrenzen, Offsets | Überwachung & Anpassung (noch in Entwicklung) |
| Verknüpfung | Schweiz | Quebec | Keine (bisher) |
| Herausforderungen | Carbon Leakage, soziale Akzeptanz (ETS 2) | Offset-Integrität, politische Unsicherheit | Daten-MRV, Marktliquidität, Preisvolatilität |

Anmerkung: Die Tabelle zeigt vereinfachte Merkmale. Die genauen Details variieren und entwickeln sich ständig weiter. Die Daten basieren auf den genannten Referenzen und aktuellen Systembeschreibungen.

Die Tabelle verdeutlicht, dass das EU ETS eine hohe Ambition durch eine feste jährliche Cap-Reduktion und die MSR zur Marktstabilisierung verfolgt. Kalifornien zeichnet sich durch seine breite Sektorabdeckung und die innovative Kopplung mit Quebec aus, während China einen auf sein schnelles Wirtschaftswachstum zugeschnittenen, intensitätsbasierten Ansatz wählt. Jedes System steht vor spezifischen Herausforderungen, die eine kontinuierliche Anpassung und Verbesserung erfordern.

2.2 Theoretische Fundamente der Umweltökonomie und Kohlenstoffpreisgestaltung

Die Einführung von Kohlenstoffpreisen und Emissionshandelssystemen ist tief in den Prinzipien der Umweltökonomie verwurzelt. Diese Disziplin befasst sich mit der Frage, wie ökonomische Aktivitäten die Umwelt beeinflussen und wie Umweltpolitik so gestaltet werden kann, dass sie die Wohlfahrt maximiert. Kernstück ist die Internalisierung externer Kosten, die durch die Nutzung von Umweltgütern entstehen.

2.2.1 Ökonomische Instrumente zur Umweltregulierung: Pigou und Coase.

Die theoretische Basis für die Umweltregulierung mittels ökonomischer Instrumente wurde maßgeblich von den Arbeiten Arthur Pigous und Ronald Coases geprägt. Arthur Pigou führte Anfang des 20. Jahrhunderts das Konzept der Externalitäten ein, also der unkompensierten Auswirkungen ökonomischer Aktivitäten auf Dritte. Im Falle der Umweltverschmutzung, wie der Emission von Treibhausgasen, entstehen soziale Kosten (z.B. Klimaschäden), die nicht im Marktpreis des verursachenden Gutes enthalten sind. Pigou schlug vor, diese externen Kosten durch eine Steuer - die sogenannte Pigou-Steuer - zu internalisieren. Eine solche Steuer auf CO₂-Emissionen würde die Produzenten dazu anregen, ihre Emissionen zu reduzieren, da jede emittierte Einheit mit zusätzlichen Kosten verbunden wäre. Die Höhe der Steuer sollte dabei den Grenzkosten der externen Schäden entsprechen, um die soziale Effizienz zu maximieren (Amberg et al., 2022).

Ronald Coase erweiterte diese Perspektive in den 1960er Jahren mit seinem Coase-Theorem. Coase argumentierte, dass in einer Welt ohne Transaktionskosten und bei klar definierten Eigentumsrechten die Parteien unabhängig von der anfänglichen Zuteilung der Rechte zu einer effizienten Lösung der Externalitätenprobleme gelangen würden. Wenn beispielsweise das Recht, Emissionen auszustoßen, oder das Recht auf saubere Luft klar definiert ist, könnten die Parteien durch Verhandlungen eine optimale Emissionsmenge

erreichen. Das Coase-Theorem lieferte eine wichtige theoretische Grundlage für marktbasierter Instrumente wie den Emissionshandel, bei dem Eigentumsrechte an Emissionszertifikaten gehandelt werden. Es betont die Bedeutung der Eigentumsrechte und der Reduktion von Transaktionskosten für die effiziente Allokation von Umweltgütern (Pies & Will, 2012).

Der Vergleich zwischen Pigou-Steuern und Coase-Lösungen im Kontext des Klimaschutzes zeigt die unterschiedlichen Ansätze zur Problemlösung. Pigou-Steuern (wie eine Kohlenstoffsteuer) bieten Preissicherheit, indem sie einen festen Preis pro Emissionseinheit festlegen, die Menge der Emissionsreduktion aber unsicher lassen. Coase-basierte Lösungen (wie Cap-and-Trade) bieten Mengensicherheit, indem sie eine Obergrenze für Emissionen festlegen, aber den Preis volatile gestalten. Beide Ansätze zielen darauf ab, die Kosten der Umweltverschmutzung zu internalisieren und Anreize für umweltfreundliches Verhalten zu schaffen, unterscheiden sich jedoch in ihren Mechanismen und Implikationen für Marktteilnehmer und die Politikgestaltung.

2.2.2 Marktbasierter Instrumente: Steuern versus Zertifikate.

Die Debatte zwischen Kohlenstoffsteuern (Carbon Tax) und Emissionshandelssystemen (Cap-and-Trade) ist ein zentraler Pfeiler der umweltökonomischen Diskussion über marktbasierter Instrumente zur Emissionsreduktion. Beide Instrumente nutzen den Preismechanismus, um Anreize für Emissionsminderungen zu schaffen, unterscheiden sich jedoch grundlegend in ihrer Funktionsweise und ihren ökonomischen Eigenschaften (Timilsina, 2018).

Eine **Kohlenstoffsteuer** legt einen festen Preis pro Tonne CO₂-Äquivalent fest, die Unternehmen für ihre Emissionen entrichten müssen. Der Staat legt den Steuersatz fest, und die Unternehmen entscheiden eigenverantwortlich, wie viel sie emittieren und wie viel Steuer sie dafür zahlen. Die Hauptvorteile einer Kohlenstoffsteuer liegen in ihrer Einfachheit, Preissicherheit und der Möglichkeit, Einnahmen für den Staat zu generieren (Timilsina, 2018). Für Unternehmen schafft ein stabiler CO₂-Preis Planungssicherheit und erleichtert Investitionen in kohlenstoffarme Technologien. Die Einnahmen können wiederum zur Reduzierung

anderer Steuern, zur Förderung grüner Technologien oder zur Kompensation von Härtefällen verwendet werden (Steckel et al., 2021). Ein Nachteil ist jedoch die Unsicherheit hinsichtlich der tatsächlich erreichten Emissionsreduktion: Die Menge der Reduktion hängt von der Preiselastizität der Nachfrage ab und kann schwer vorhergesagt werden. Zudem kann die Einführung einer Kohlenstoffsteuer politisch schwierig sein, da sie als zusätzliche Belastung für Unternehmen und Haushalte wahrgenommen werden kann (Bubna-Litic & Chalifour, 2012).

Ein **Emissionshandelssystem (Cap-and-Trade)** hingegen setzt eine Obergrenze (Cap) für die Gesamtemissionen in einem bestimmten Sektor oder einer Volkswirtschaft fest. Innerhalb dieses Caps werden Emissionszertifikate ausgegeben, die jeweils die Emission einer Tonne CO₂-Äquivalent erlauben. Diese Zertifikate können von den Unternehmen gehandelt werden. Unternehmen, die ihre Emissionen kostengünstig reduzieren können, verkaufen überschüssige Zertifikate, während Unternehmen mit höheren Reduktionskosten Zertifikate zukaufen. Der Preis der Zertifikate bildet sich am Markt durch Angebot und Nachfrage (Timilsina, 2018). Der Hauptvorteil von Cap-and-Trade-Systemen ist die Mengensicherheit: Das Cap garantiert, dass die Emissionen eine bestimmte Obergrenze nicht überschreiten. Dies ist besonders vorteilhaft, wenn die Erreichung eines spezifischen Emissionsziels entscheidend ist, wie es bei Klimazielen der Fall ist. Allerdings sind die CO₂-Preise in einem ETS volatil, was die Planungssicherheit für Unternehmen beeinträchtigen kann (Yu et al., 2022)(Liu et al., 2024). Zudem erfordert ein ETS eine aufwendigere administrative Infrastruktur für die Zuteilung, Überwachung und den Handel der Zertifikate (Bode, 2005).

In der Praxis existieren auch hybride Ansätze, die Elemente beider Instrumente kombinieren, beispielsweise durch die Einführung von Preisunter- oder -obergrenzen (Price Collars) in einem ETS, um die Volatilität zu reduzieren und mehr Preissicherheit zu schaffen. Die Wahl zwischen einer Kohlenstoffsteuer und einem ETS hängt von verschiedenen Faktoren ab, darunter die politischen Präferenzen, die administrativen Kapazitäten, die spezifischen Ziele der Klimapolitik und die Sensibilität gegenüber Preis- oder Mengenunsicherheit.

2.2.3 Allokationsfragen und Verteilungswirkungen.

Die Gestaltung von Kohlenstoffpreismechanismen, insbesondere von Emissionshandelssystemen, wirft zentrale Fragen der Allokation und Verteilungsgerechtigkeit auf. Die Art und Weise, wie Emissionszertifikate anfänglich zugeteilt werden und welche Auswirkungen der Kohlenstoffpreis auf verschiedene Akteure hat, sind entscheidend für die Akzeptanz, Effizienz und Fairness des Systems.

Es gibt im Wesentlichen zwei Hauptmethoden der anfänglichen Zertifikatzuteilung in einem ETS: die kostenlose Zuteilung (Grandfathering) und die Versteigerung (Auktionierung). Bei der **kostenlosen Zuteilung** erhalten die Unternehmen Zertifikate basierend auf historischen Emissionen oder anderen Kriterien. Dies war der dominierende Ansatz in den frühen Phasen des EU ETS (Bode, 2005)(Ochsenreiher & Zirkel, 2014). Ein Vorteil des Grandfathering ist die höhere Akzeptanz bei den betroffenen Industrien, da es die anfänglichen Kosten der Systemumstellung reduziert. Es kann jedoch zu “Windfall Profits” führen, wenn Unternehmen die Kosten der ihnen kostenlos zugeteilten Zertifikate an ihre Kunden weitergeben, ohne selbst dafür bezahlt zu haben (Höffner & Schubert, 2022). Zudem kann Grandfathering als ineffizient angesehen werden, da es keine Einnahmen für den Staat generiert und Anreize zur Investition in neue, emissionsarme Anlagen verzerrt, wenn die Zuteilung an die Produktion gebunden ist.

Die **Versteigerung** von Emissionszertifikaten hingegen ist der ökonomisch bevorzugte Ansatz. Hier müssen Unternehmen die Zertifikate am Markt kaufen, was einen direkten Preis für Emissionen schafft und die Einnahmen dem Staat zugutekommen lässt. Diese Einnahmen können für verschiedene Zwecke verwendet werden, beispielsweise zur Finanzierung von Klimaschutzmaßnahmen, zur Senkung anderer Steuern oder zur Umverteilung an Haushalte, um soziale Härtefälle abzufedern (Steckel et al., 2021). Die Auktionierung fördert zudem die Effizienz, da Unternehmen von Anfang an die wahren Kosten ihrer Emissionen tragen. Der Übergang zur Auktionierung im EU ETS (Ochsenreiher & Zirkel, 2014) und in anderen Systemen zeigt eine Entwicklung hin zu ökonomisch effizienteren Zuteilungsmechanismen.

Über die Allokation hinaus sind die **Verteilungswirkungen** von Kohlenstoffpreisen von großer Bedeutung. Ein Kohlenstoffpreis kann regressiv wirken, da ärmere Haushalte einen größeren Anteil ihres Einkommens für energieintensive Güter und Dienstleistungen ausgeben (Bubna-Litic & Chalifour, 2012)(Steckel et al., 2021). Dies kann zu erhöhter Energiearmut und sozialer Ungleichheit führen, wenn keine Ausgleichsmaßnahmen ergriffen werden. Studien in Entwicklungsländern Asiens haben die Verteilungswirkungen von Kohlenstoffpreisen untersucht und die Notwendigkeit von flankierenden Maßnahmen zur Milderung negativer Auswirkungen auf vulnerable Gruppen betont (Steckel et al., 2021). Um die soziale Akzeptanz zu gewährleisten, ist es entscheidend, die Einnahmen aus der Kohlenstoffpreisgestaltung fair und transparent zu verwenden. Dies kann durch direkte Rückzahlungen an Haushalte (Carbon Dividends), Investitionen in öffentliche Verkehrsmittel oder die Förderung energieeffizienter Technologien geschehen, die allen zugutekommen. Die Diskussion um Verteilungsgerechtigkeit ist daher nicht nur eine ethische Frage, sondern auch ein entscheidender Faktor für die politische Machbarkeit und langfristige Stabilität von Kohlenstoffpreissystemen.

2.3 CO₂-Preismechanismen als Instrumente des Klimaschutzes

Kohlenstoffpreismechanismen sind als Kerninstrumente des Klimaschutzes konzipiert, um eine effiziente und kostengünstige Reduktion von Treibhausgasemissionen zu ermöglichen. Ihre Attraktivität liegt in ihrer Fähigkeit, über den Markt Anreize zu schaffen, anstatt auf direkte Regulierung zu setzen. Dieser Ansatz hat das Potenzial, tiefgreifende Veränderungen in der Wirtschaftsweise zu bewirken.

2.3.1 Funktionsweise und Ziele der Kohlenstoffpreisgestaltung.

Die grundlegende Funktionsweise der Kohlenstoffpreisgestaltung besteht darin, den Emittenten von Treibhausgasen einen monetären Preis für jede emittierte Tonne CO₂-Äquivalent aufzuerlegen (Timilsina, 2018). Dieser Preis kann entweder direkt (über eine Kohlenstoffsteuer) oder indirekt (über den Kauf von Emissionszertifikaten in einem ETS)

erhoben werden. Das Hauptziel ist die Internalisierung der externen Kosten von Emissionen, die andernfalls von der Gesellschaft in Form von Klimaschäden getragen würden. Indem Emissionen einen Preis erhalten, werden sie zu einem Kostenfaktor für Unternehmen, der in ihre Produktionsentscheidungen und Investitionsplanungen einfließt.

Dies schafft einen starken Anreiz zur Emissionsreduktion. Unternehmen werden motiviert, ihre Prozesse effizienter zu gestalten, auf emissionsärmere Brennstoffe umzusteigen oder in innovative Technologien zu investieren, um ihre Kosten zu senken (Scotti et al., 2024)(Chen et al., 2024). Der Marktmechanismus sorgt dafür, dass diese Reduktionen dort erfolgen, wo sie am kostengünstigsten sind, was die gesamtwirtschaftliche Effizienz des Klimaschutzes maximiert (Timilsina, 2018). Darüber hinaus fördern Kohlenstoffpreise auch die Entwicklung und den Einsatz von kohlenstoffarmen Technologien, da diese durch den Preisvorteil gegenüber emissionsintensiven Alternativen wettbewerbsfähiger werden. Dies stimuliert grüne Innovationen und treibt den Strukturwandel hin zu einer nachhaltigen Wirtschaft voran (Chen et al., 2024).

Ein weiteres wichtiges Ziel der Kohlenstoffpreisgestaltung ist die Generierung von Einnahmen. Sowohl Kohlenstoffsteuern als auch die Versteigerung von Emissionszertifikaten generieren erhebliche fiskalische Mittel. Diese Einnahmen können vielfältig eingesetzt werden: Sie können zur Finanzierung weiterer Klimaschutzmaßnahmen, zur Förderung erneuerbarer Energien, zur Unterstützung von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel oder zur Entlastung von Bürgern und Unternehmen durch Steuersenkungen oder Dividendenzahlungen verwendet werden (Steckel et al., 2021). Die transparente und strategische Verwendung dieser Einnahmen ist entscheidend für die Akzeptanz und Legitimität des Kohlenstoffpreises. Letztlich tragen Kohlenstoffpreismechanismen dazu bei, die Klimaziele zu erreichen, indem sie einen klaren wirtschaftlichen Rahmen für die Dekarbonisierung schaffen und Investitionen in eine kohlenstoffneutrale Zukunft lenken.

2.3.2 Implementierung von Kohlenstoffpreisen in verschiedenen Sektoren.

Die Wirksamkeit von Kohlenstoffpreismechanismen hängt maßgeblich von ihrer Implementierung in verschiedenen Wirtschaftssektoren ab. Während die ersten Emissionshandelssysteme oft auf energieintensive Industrien und den Stromsektor abzielten, wird zunehmend die Notwendigkeit erkannt, den Kohlenstoffpreis auf eine breitere Palette von Sektoren auszudehnen, um umfassende Emissionsminderungen zu erzielen.

Der **Energiesektor**, insbesondere die Stromerzeugung, war traditionell der erste und wichtigste Sektor, der in Kohlenstoffpreissysteme integriert wurde. Dies liegt daran, dass Emissionen hier relativ leicht messbar sind und oft große Einzelquellen vorliegen. Im EU ETS hat der Kohlenstoffpreis zu einem deutlichen Strukturwandel im Stromsektor geführt, indem er die Kohleverstromung unattraktiver gemacht und den Ausbau erneuerbarer Energien sowie den Umstieg auf Gas (als Brückentechnologie) beschleunigt hat (Vallés et al., 2012).

Die **Industrie**, insbesondere Sektoren wie Zement, Stahl und Chemie, sind ebenfalls zentrale Bestandteile vieler ETS. Diese Sektoren stehen oft vor der Herausforderung hoher Reduktionskosten und dem Risiko der Carbon Leakage, d.h. der Verlagerung von Produktion und Emissionen in Länder ohne vergleichbare Kohlenstoffpreise (Gabela et al., 2024). Daher werden hier oft spezifische Zuteilungsregeln oder Kompensationsmechanismen angewendet, um die Wettbewerbsfähigkeit zu erhalten. Studien untersuchen die Auswirkungen des ETS auf die Wettbewerbsfähigkeit dieser Industrien.

Der **Transportsektor** stellt eine besondere Herausforderung dar. Hier sind Emissionen diffus, und es gibt eine hohe Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen. Dennoch werden Kohlenstoffpreise zunehmend auch hier implementiert. Das EU ETS wurde auf den inner-europäischen Luftverkehr ausgedehnt (Wang, 2023), und Pläne sehen die Einbeziehung des Seeverkehrs vor (Wang, 2023). Es gibt auch Bestrebungen, den Straßenverkehr durch eigene ETS oder Kohlenstoffsteuern zu bepreisen (Peng et al., 2024). Studien untersuchen die Auswirkungen von Kohlenstoffpreisen auf den Güterverkehr und die Logistik (Romano et al.,

2022). Die Integration des Transportsektors ist entscheidend, da er einen wachsenden Anteil an den Gesamtemissionen hat.

Auch in der **Landwirtschaft** wird das Potenzial von Kohlenstoffpreisen diskutiert, insbesondere im Kontext von Kohlenstoff-Grenzausgleichsmechanismen (CBAM), die Carbon Leakage verhindern sollen (Gabela et al., 2024). Darüber hinaus spielen Kohlenstoffpreise eine Rolle bei der Bewertung und Förderung von **CCS (Carbon Capture and Storage)-Technologien** (Setyawati & Wibawa, 2024) und anderen negativen Emissionstechnologien (Traeger & Balu, 2024), indem sie Anreize für deren Entwicklung und Einsatz schaffen. Die Ausweitung der Kohlenstoffpreisgestaltung auf diese vielfältigen Sektoren ist ein Zeichen für ihre wachsende Relevanz und Anpassungsfähigkeit als umfassendes Klimaschutzinstrument.

2.3.3 Die Rolle von Kohlenstoffmärkten in der globalen Klimapolitik.

Kohlenstoffmärkte spielen eine zunehmend zentrale Rolle in der globalen Klimapolitik und sind ein integraler Bestandteil der Anstrengungen, die im Pariser Abkommen festgelegten Ziele zu erreichen. Das Pariser Abkommen, das 2015 verabschiedet wurde, unterscheidet sich vom Kyoto-Protokoll dadurch, dass es keine verbindlichen Emissionsziele von oben herab vorschreibt, sondern einen Bottom-up-Ansatz verfolgt, bei dem Länder ihre eigenen national festgelegten Beiträge (Nationally Determined Contributions, NDCs) einreichen (Asadnabizadeh, 2024). Innerhalb dieses Rahmens bieten Kohlenstoffmärkte flexible Mechanismen, um die Erreichung dieser NDCs zu unterstützen und die globalen Reduktionskosten zu senken.

Artikel 6 des Pariser Abkommens ist hierbei von besonderer Bedeutung. Er sieht die Möglichkeit vor, dass Länder kooperativ Emissionsminderungen erzielen und diese international übertragen können. Dies umfasst sowohl einen Mechanismus für den Handel mit Emissionsminderungen zwischen Ländern (ähnlich den Kyoto-Mechanismen) als auch einen Rahmen für nicht-marktbasierter Ansätze. Die Verhandlungen über die genaue Ausgestaltung von Artikel 6 waren langwierig und komplex, da sie Fragen der Doppelzählung

von Emissionsminderungen, der Governance und der Sicherstellung der Umweltintegrität betreffen (Asadnabizadeh, 2024). Dennoch wird erwartet, dass Artikel 6 einen wichtigen Beitrag zur Schaffung eines globalen Kohlenstoffmarktes leisten wird, der die Effizienz der Klimaschutzmaßnahmen weltweit steigert.

Die globale Relevanz von Kohlenstoffmärkten zeigt sich auch in der Vielzahl nationaler und regionaler Emissionshandelssysteme und Kohlenstoffsteuern, die bereits in Betrieb sind oder sich in Entwicklung befinden. Diese Systeme decken mittlerweile einen erheblichen Teil der globalen Emissionen ab und schaffen ein Netzwerk von Kohlenstoffpreisen, das die Anreize zur Dekarbonisierung über Ländergrenzen hinweg verstärkt (Ginneken, 2007). Die Verknüpfung dieser Systeme, wie sie beispielsweise zwischen dem EU ETS und dem schweizerischen ETS besteht, könnte zu einer weiteren Steigerung der Effizienz und Liquidität führen (Oliveira et al., 2020).

Allerdings gibt es auch kritische Stimmen, die die Rolle von Kohlenstoffmärkten in Frage stellen und auf potenzielle Fallstricke hinweisen. Einige argumentieren, dass globale Kohlenstoffmärkte, insbesondere der Handel mit Kohlenstoffgutschriften, zu einem “Paradox und Fehlschluss” führen könnten, indem sie die wahre Dringlichkeit des Klimaschutzes verschleiern und die notwendige Transformation verzögern (Cheong, 2025). Es wird auch diskutiert, ob die derzeitigen Kohlenstoffpreise ausreichen, um die notwendigen Investitionen in kohlenstofffreie Technologien anzustoßen und die 1,5-Grad-Grenze des Pariser Abkommens zu erreichen (Achakulwisut et al., 2023). Trotz dieser Debatten bleiben Kohlenstoffmärkte ein zentrales und sich entwickelndes Instrument in der globalen Klimapolitik, dessen Rolle in Zukunft voraussichtlich weiter wachsen wird.

2.4 Empirische Evidenz zur Wirksamkeit von Emissionshandelssystemen und Kohlenstoffpreisen

Die theoretische Begründung für Kohlenstoffpreismechanismen ist überzeugend, doch ihre tatsächliche Wirksamkeit in der Praxis ist Gegenstand umfangreicher empirischer

Forschung. Zahlreiche Studien haben versucht, die Auswirkungen von Emissionshandelssystemen und Kohlenstoffsteuern auf Emissionsreduktionen, wirtschaftliche Leistung und technologische Innovationen zu quantifizieren.

2.4.1 Analysen der Emissionsreduktion.

Eine der wichtigsten Fragen bei der Bewertung von Kohlenstoffpreismechanismen ist, ob sie tatsächlich zu einer Reduktion der Treibhausgasemissionen führen. Empirische Studien, die sich auf das EU ETS konzentrieren, haben gezeigt, dass das System einen messbaren Effekt auf die Emissionsminderung hatte. Beydemir (2016) untersuchte den Einfluss des EU ETS auf die CO₂-Emissionen und stellte fest, dass es signifikante Reduktionen bewirkt hat (Beydemir, 2016). Ähnliche Befunde lieferten Klimko und Hasprová (2025), die die Auswirkungen des EU ETS auf die Treibhausgasemissionen in den Visegrád-Ländern analysierten und ebenfalls positive Effekte dokumentierten (Klimko & Hasprová, 2025). Wu, Tambunlertchai et al. (2020) untersuchten die Auswirkungen von Emissionshandelssystemen im Allgemeinen und bestätigten deren Wirksamkeit bei der Emissionsreduktion (Wu et al., 2020).

Auch außerhalb Europas gibt es empirische Belege für die Wirksamkeit von ETS. Cui, Wang et al. (2021) evaluierten die regionalen Kohlenstoffmarkt-Pilotprojekte in China und fanden heraus, dass diese Programme die CO₂-Emissionen der teilnehmenden Unternehmen signifikant reduziert haben (Cui et al., 2021). Wang (2024) analysierte die Auswirkungen der chinesischen Kohlenstoffemissionshandelspolitik und kam ebenfalls zu dem Schluss, dass sie zur Emissionsminderung beigetragen hat (Wang, 2024). Diese Studien nutzen oft ökonometrische Methoden, wie Difference-in-Differences-Ansätze oder synthetische Kontrollmethoden, um die kausalen Effekte der ETS von anderen Einflussfaktoren zu isolieren.

Trotz dieser positiven Ergebnisse gibt es Herausforderungen bei der Kausalitätsfeststellung. Die Emissionsentwicklung wird von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst, darunter Wirtschaftswachstum, technologische Fortschritte und andere politische Maßnahmen. Es ist oft schwierig, den spezifischen Beitrag des Kohlenstoffpreises eindeutig zu isolieren. Zudem

variiert die Wirksamkeit je nach Design des ETS (z.B. Höhe des Caps, Zuteilungsmechanismen, Preisstabilität) und dem spezifischen Sektor. Phasen der Überallokation von Zertifikaten, wie in den frühen Phasen des EU ETS beobachtet, können die Anreizwirkung des Preises mindern und die Emissionsreduktion verlangsamen (Bode, 2005). Dennoch überwiegen die Belege, die darauf hindeuten, dass gut konzipierte und umgesetzte Kohlenstoffpreismechanismen ein wirksames Instrument zur Reduktion von Treibhausgasemissionen darstellen.

2.4.2 Auswirkungen auf Wirtschaft und Innovation.

Neben der direkten Emissionsreduktion sind die Auswirkungen von Kohlenstoffpreisen auf die Wirtschaft und die Förderung technologischer Innovationen von zentralem Interesse. Kritiker befürchten oft negative Auswirkungen auf die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen und das Risiko der “Carbon Leakage”, also der Verlagerung von Emissionen in Jurisdiktionen ohne Kohlenstoffpreis (Gabela et al., 2024). Empirische Studien haben diese Befürchtungen untersucht.

Ein zentrales Thema ist die **Carbon Leakage**. Gabela, Spiegel et al. (2024) untersuchten Carbon Leakage in der Landwirtschaft und die Rolle von Kohlenstoff-Grenzausgleichsmechanismen (CBAM) zur Minderung dieses Risikos (Gabela et al., 2024). Die Einführung eines CBAM zielt darauf ab, Importe aus Ländern mit geringeren Klimaschutzambitionen mit einem Kohlenstoffpreis zu belegen, um die Wettbewerbsnachteile für heimische Unternehmen auszugleichen und Anreize für globale Emissionsminderungen zu schaffen. Bisherige Studien zum EU ETS haben gezeigt, dass die tatsächliche Carbon Leakage in den meisten Sektoren geringer war als ursprünglich befürchtet, was oft auf die spezifischen Schutzmaßnahmen für gefährdete Industrien zurückzuführen ist (Neuhoff et al., 2015).

Hinsichtlich der **technologischen Innovation** zeigen viele Studien positive Effekte. Chen, Brockway et al. (2024) untersuchten den Einfluss von Emissionshandelssystemen auf technologische Innovationen und fanden heraus, dass sie einen signifikanten Anreiz für die

Entwicklung und Einführung umweltfreundlicher Technologien darstellen (Chen et al., 2024). Scotti, Flori et al. (2024) diskutierten die Rolle von “demand-pull” und “technology-push” Mechanismen in der Umweltinnovation und wie Kohlenstoffpreise beide Aspekte stimulieren können (Scotti et al., 2024). Indem sie Emissionen verteuern, schaffen Kohlenstoffpreise einen Nachfragezug für kohlenstoffarme Lösungen und ermutigen Unternehmen, in Forschung und Entwicklung zu investieren.

Die **makroökonomischen Auswirkungen** von Kohlenstoffpreisen sind ebenfalls Gegenstand der Forschung. Olasehinde-Williams (2024) untersuchte die Auswirkungen der Kohlenstoffpreisgestaltung auf die aggregierte makroökonomische Leistung und stellte fest, dass die Effekte komplex sind und von der spezifischen Gestaltung und der Verwendung der Einnahmen abhängen (Olasehinde-Williams, 2024). Während eine falsch kalibrierte Kohlenstoffpreisgestaltung das Wirtschaftswachstum bremsen könnte, können gut gestaltete Systeme, insbesondere mit einer intelligenten Verwendung der Einnahmen (z.B. durch Steuersenkungen oder Investitionen in grüne Infrastruktur), positive Impulse für die Wirtschaft setzen und einen “Green Growth” fördern (Frondel, 2020). Die Preisanalyse und Volatilität von Kohlenstoffmärkten sind ebenfalls wichtige Aspekte, die die Entscheidungen der Unternehmen beeinflussen (Yu et al., 2022)(Liu et al., 2024). Studien zur Volatilität des chinesischen Kohlenstoffmarktes zeigen die Notwendigkeit von Mechanismen zur Preisstabilität (Yu et al., 2022).

2.4.3 Sektorale und regionale Fallstudien.

Die empirische Evidenz zur Wirksamkeit von Kohlenstoffpreismechanismen wird durch detaillierte sektorale und regionale Fallstudien ergänzt, die spezifische Auswirkungen und Herausforderungen beleuchten. Diese Studien ermöglichen ein tieferes Verständnis der Mechanismen, durch die Kohlenstoffpreise wirken und welche Anpassungen in unterschiedlichen Kontexten erforderlich sind.

Der **Elektrizitätssektor** ist ein Paradebeispiel für die Transformation durch Kohlenstoffpreise. Vallés, Reneses et al. (2012) analysierten den Einfluss des EU ETS auf den europäischen Elektrizitätssektor und zeigten, wie das System Anreize für den Übergang von kohlenstoffintensiver Kohleverstromung zu Gas und erneuerbaren Energien geschaffen hat (Vallés et al., 2012). Der Kohlenstoffpreis hat die relative Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Erzeugungstechnologien verändert und so Investitionsentscheidungen beeinflusst.

Auch der **Transportsektor** rückt zunehmend in den Fokus. Wang (2023) untersuchte die Reduktionsmaßnahmen für Treibhausgasemissionen im Seeverkehr der EU und die Rolle des EU ETS in diesem Kontext (Wang, 2023). Peng, Sun et al. (2024) gaben einen Überblick über den Kohlenstoffemissionshandel im Bodentransport und hoben die Herausforderungen und Potenziale in diesem Sektor hervor (Peng et al., 2024). Romano, Tocchi et al. (2022) analysierten den Kohlenstoff-Fußabdruck des Güterverkehrs und die Möglichkeiten zur Minderung, die durch Kohlenstoffpreise gefördert werden könnten (Romano et al., 2022). Diese Studien zeigen, dass die Implementierung im Transportsektor komplex ist, aber großes Potenzial für Emissionsreduktionen birgt.

Regionale Fallstudien bieten wertvolle Einblicke in die Anpassung von ETS an spezifische lokale Gegebenheiten. Die Erfahrungen mit den **chinesischen regionalen Kohlenstoffmarkt-Pilotprojekten** (Cui et al., 2021)(Wang, 2024) lieferten wichtige Lehren für die Gestaltung des nationalen Systems, insbesondere im Hinblick auf die Zuteilungsmechanismen und die Einbeziehung des Elektrizitätssektors (Zeng et al., 2018). Steckel, Dorband et al. (2021) untersuchten die Verteilungswirkungen der Kohlenstoffpreisgestaltung in Entwicklungsländern Asiens (Steckel et al., 2021), was die Notwendigkeit maßgeschneiderter Ansätze und sozialer Ausgleichsmaßnahmen in verschiedenen sozioökonomischen Kontexten unterstreicht.

Diese sektoralen und regionalen Analysen bestätigen, dass Kohlenstoffpreismechanismen ein mächtiges Instrument zur Emissionsreduktion und zur Förderung grüner Technologien sein können. Sie verdeutlichen aber auch, dass der Erfolg von der sorgfältigen Gestaltung des

Systems, der Berücksichtigung sektorspezifischer Herausforderungen und der Implementierung flankierender Maßnahmen abhängt, um negative soziale oder wirtschaftliche Auswirkungen zu minimieren. Die kontinuierliche Überwachung und Anpassung der Systeme auf Basis empirischer Evidenz ist entscheidend für ihre langfristige Wirksamkeit.

2.5 Kritische Perspektiven, Herausforderungen und zukünftige Entwicklungen

Trotz der belegten Wirksamkeit und der breiten Akzeptanz von Kohlenstoffpreis-mechanismen als Instrumente des Klimaschutzes sind diese Ansätze nicht ohne Kritik und stehen vor erheblichen Herausforderungen. Die Auseinandersetzung mit diesen kritischen Perspektiven ist entscheidend, um die Systeme weiter zu verbessern und ihre langfristige Effektivität und Akzeptanz zu gewährleisten.

2.5.1 Systemische Schwächen und Designfehler.

Ein wiederkehrender Kritikpunkt an Emissionshandelssystemen betrifft **systemische Schwächen und Designfehler**, die ihre Wirksamkeit beeinträchtigen können. Eine der größten Herausforderungen in der Vergangenheit war die **Überallokation von Zertifikaten**, insbesondere in den frühen Phasen des EU ETS (Bode, 2005). Eine zu großzügige Zuteilung führte zu einem Überschuss an Zertifikaten im Markt, was die CO2-Preise drückte und die Anreize zur Emissionsminderung schwächte. Die Einführung der Marktstabilitätsreserve (MSR) im EU ETS war eine direkte Reaktion auf dieses Problem und hat maßgeblich zur Erholung und Stabilisierung der Preise beigetragen (Liu et al., 2024).

Die **Preisschwankungen und Marktstabilität** sind weitere kritische Aspekte. Ein volatiler Kohlenstoffpreis erschwert Unternehmen die langfristige Planung von Investitionen in kohlenstoffarme Technologien (Yu et al., 2022). Während ein ETS Mengensicherheit bietet, geht dies oft auf Kosten der Preissicherheit. Studien zur Volatilität von Kohlenstoffmärkten, wie die Analyse des chinesischen Marktes durch Yu, Wang et al. (2022), unterstreichen die

Notwendigkeit von Mechanismen, die extreme Preisschwankungen abfedern können (Yu et al., 2022). Dies können Preisunter- oder -obergrenzen sein, die in einigen Systemen implementiert sind.

Lobbyismus und politische Einflussnahme stellen ebenfalls eine dauerhafte Herausforderung dar. Industrien mit hohem Emissionsaufkommen haben ein starkes Interesse an einer großzügigen Zuteilung von Zertifikaten oder niedrigen Kohlenstoffpreisen, was zu politischen Kompromissen führen kann, die die Ambition des Systems untergraben. Die Entscheidungen über das Cap, die Zuteilungsmethoden und die Ausnahmen sind oft das Ergebnis komplexer politischer Verhandlungen, die nicht immer optimal aus umweltökonomischer Sicht sind (Ochsenreicher & Zirkel, 2014).

Schließlich spielt die **Rolle von Finanzmärkten** eine ambivalente Rolle. Während die Teilnahme von Finanzakteuren die Liquidität des Kohlenstoffmarktes erhöhen kann, besteht auch das Risiko von Spekulation und Preisblasen, die die Preisstabilität und somit die Planbarkeit für die Realwirtschaft beeinträchtigen können. Ballor (2025) diskutiert die “Marketisierung von Klimarisiken” und die Rolle der Finanzmärkte im Kontext des EU ETS (Ballor, 2025). Lohano, Kumar et al. (2025) untersuchen die Auswirkungen des Klimawandels auf Finanzmärkte im Allgemeinen (Lohano et al., 2025), was die Wechselwirkungen zwischen Klimapolitik und Finanzstabilität verdeutlicht. Eine robuste Regulierung und Überwachung der Kohlenstoffmärkte ist daher unerlässlich.

2.5.2 Soziale Gerechtigkeit und Verteilungswirkungen.

Ein weiterer wichtiger Kritikpunkt betrifft die **soziale Gerechtigkeit und die Verteilungswirkungen** von Kohlenstoffpreisen. Wie bereits erwähnt, können Kohlenstoffpreise regressiv wirken, da sie tendenziell ärmere Haushalte stärker belasten, die einen größeren Anteil ihres Einkommens für Energie und energieintensive Güter aufwenden müssen (Bubna-Litic & Chalifour, 2012)(Steckel et al., 2021). Dies kann zu einer Zunahme der

Energiearmut und einer Verschärfung sozialer Ungleichheiten führen, wenn keine geeigneten Ausgleichsmaßnahmen ergriffen werden.

Studien wie die von Steckel, Dorband et al. (2021) in Entwicklungsländern Asiens unterstreichen die Notwendigkeit, die Verteilungswirkungen sorgfältig zu analysieren und kompensatorische Maßnahmen zu ergreifen (Steckel et al., 2021). Solche Maßnahmen können beispielsweise direkte Rückzahlungen von Kohlenstoffdividenden an Haushalte, gezielte Unterstützung für einkommensschwache Haushalte zur Verbesserung der Energieeffizienz oder Investitionen in öffentliche Verkehrsmittel umfassen, die allen zugutekommen. Die Gestaltung der Einnahmenverwendung ist hierbei von entscheidender Bedeutung: Wenn die Einnahmen aus Kohlenstoffpreisen zur Finanzierung von Programmen verwendet werden, die die Ungleichheit verringern oder die Anpassung an den Klimawandel fördern, kann die soziale Akzeptanz des Instruments erheblich gesteigert werden.

Die Frage der **sozialen Akzeptanz** ist eng mit der Verteilungsgerechtigkeit verbunden. Eine Politik, die als unfair oder ungerecht empfunden wird, hat geringere Chancen auf langfristigen Erfolg und politische Stabilität. Daher ist es unerlässlich, bei der Gestaltung von Kohlenstoffpreissystemen nicht nur die ökonomische Effizienz, sondern auch die sozialen Auswirkungen und die Bedürfnisse vulnerabler Gemeinschaften zu berücksichtigen (Bubna-Litic & Chalifour, 2012). Dies erfordert eine transparente Kommunikation über die Vorteile des Klimaschutzes und die faire Verteilung der Lasten und Vorteile der Klimapolitik. Ohne eine breite gesellschaftliche Akzeptanz könnten selbst die effektivsten ökonomischen Instrumente scheitern.

2.5.3 Die Zukunft der Kohlenstoffpreisgestaltung.

Angesichts der Dringlichkeit des Klimawandels und der Erfahrungen mit bestehenden Systemen wird die Kohlenstoffpreisgestaltung voraussichtlich weiterhin eine zentrale Rolle in der globalen Klimapolitik spielen, aber auch eine kontinuierliche Weiterentwicklung erfahren. Zukünftige Entwicklungen werden sich auf die **Erweiterung der Sektoren und der**

geografischen Abdeckung konzentrieren. Dies beinhaltet die Integration von Sektoren, die bisher schwer zu dekarbonisieren waren, wie Landwirtschaft, Gebäude und Transport (Peng et al., 2024)(Gabela et al., 2024). Die Einführung eines separaten ETS für Gebäude und Straßenverkehr in der EU ist ein Beispiel für diese Entwicklung.

Die **Integration mit anderen Klimaschutzinstrumenten** wird ebenfalls an Bedeutung gewinnen. Kohlenstoffpreise sind kein Allheilmittel und entfalten ihre volle Wirkung oft erst im Zusammenspiel mit ergänzenden Politiken, wie Subventionen für erneuerbare Energien, Regulierungen für Energieeffizienz oder Investitionen in Forschung und Entwicklung (F&E) (Fais & Blesl, 2015)(Nachtigall, 2019). Fais und Blesl (2015) diskutieren die Integration von Politikinstrumenten in Energiesystemmodelle (Fais & Blesl, 2015), um die Wechselwirkungen und die optimale Kombination von Maßnahmen zu verstehen. Nachtigall (2019) untersucht, wie die wirtschaftliche Effizienz und die Klimaschutzwirkung durch eine verbesserte Integration von Politikinstrumenten optimiert werden können (Nachtigall, 2019).

Die **Rolle von negativen Emissionstechnologien (NETs)** wird in Zukunft ebenfalls wichtiger werden, da die Erreichung der ambitionierten Klimaziele wahrscheinlich nicht allein durch Emissionsreduktionen möglich sein wird. Kohlenstoffpreise können Anreize für die Entwicklung und den Einsatz von NETs wie Carbon Capture and Storage (CCS) oder direkte Luftabscheidung (DAC) schaffen (Setyawati & Wibawa, 2024)(Traeger & Balu, 2024). Traeger und Balu (2024) berichten über den zukünftigen Beitrag von ozeanischen NETs in verschiedenen Klimaszenarien (Traeger & Balu, 2024), was die Bedeutung dieser Technologien für die Erreichung der Klimaziele unterstreicht.

Schließlich wird die **internationale Kooperation und die Entwicklung globaler Kohlenstoffmärkte** weiterhin ein zentrales Thema bleiben. Das Pariser Abkommen mit seinem Artikel 6 bietet einen Rahmen für die internationale Zusammenarbeit, aber die genaue Ausgestaltung und die Schaffung eines wirklich globalen und integrierten Kohlenstoffmarktes sind noch in Arbeit (Asadnabizadeh, 2024). Chaturvedi (2012) fragte bereits, ob der Kohlenstoffmarkt das Schicksal des Planeten ändern wird (Chaturvedi, 2012), was die hohen

Erwartungen an dieses Instrument widerspiegelt. Cheong (2025) diskutiert das Paradox und die Fallstricke globaler Kohlenstoffgutschriften (Cheong, 2025), was die Notwendigkeit einer robusten Governance und einer hohen Umweltintegrität für internationale Mechanismen verdeutlicht. Die kontinuierliche Anpassung an sich ändernde Klimaziele und die Dringlichkeit der Klimakrise, wie sie Achakulwisut, Erickson et al. (2023) in globalen Reduktionspfaden unterstreichen (Achakulwisut et al., 2023), wird die zukünftige Entwicklung und Ambition der Kohlenstoffpreisgestaltung maßgeblich bestimmen.

Die Literaturübersicht zeigt, dass Kohlenstoffpreisgestaltung und Emissionshandelssysteme ein evolutionäres Feld sind, das sich ständig an neue Herausforderungen und Erkenntnisse anpasst. Ihre historische Entwicklung von den Kyoto-Mechanismen bis zu den komplexen Systemen von heute spiegelt eine Lernkurve wider. Die theoretischen Grundlagen sind solide, doch die praktische Implementierung erfordert sorgfältiges Design, um Effizienz und Gerechtigkeit zu gewährleisten. Empirische Belege bestätigen ihre Wirksamkeit, weisen aber auch auf die Notwendigkeit einer kontinuierlichen Verbesserung hin. Die zukünftige Rolle dieser Instrumente wird entscheidend sein, um die globalen Klimaziele zu erreichen, erfordert jedoch eine mutige Politik, die systemische Schwächen überwindet und soziale Aspekte umfassend berücksichtigt.

Methodik

Die vorliegende Masterarbeit verfolgt das Ziel, die Klimaschutzwirkung von CO₂-Preissystemen anhand ausgewählter Fallstudien umfassend zu analysieren. Um eine systematische und replizierbare Untersuchung zu gewährleisten, wird in diesem Kapitel der methodische Rahmen detailliert dargelegt. Dies umfasst die Definition des Analyserahmens, die Kriterien für die Auswahl der Fallstudien, die Herangehensweise an Datenquellen und Messverfahren sowie die angewandten statistischen Methoden zur Wirksamkeitsanalyse. Die Methodik ist darauf ausgelegt, die vielschichtigen Auswirkungen von Kohlenstoffpreisen auf Emissionen, Wirtschaft und technologische Innovation zu erfassen und kausale Zusam-

menhänge so weit wie möglich zu identifizieren. Ein besonderes Augenmerk liegt auf der Vergleichbarkeit der Ergebnisse zwischen den Fallstudien, um übertragbare Erkenntnisse für die Klimapolitik abzuleiten.

Analyserahmen für Klimaschutzwirkung

Der Analyserahmen für die Bewertung der Klimaschutzwirkung von CO₂-Preissystemen ist multidimensional konzipiert und berücksichtigt ökologische, ökonomische und technologische Indikatoren. Die primäre Zielsetzung von Kohlenstoffpreisen ist die Reduktion von Treibhausgasemissionen (Timilsina, 2018)(Digitemie & Ekemezie, 2024). Daher steht die direkte Messung der Emissionsreduktionen im Vordergrund. Der Rahmen unterscheidet dabei zwischen absoluten Emissionsreduktionen und Veränderungen der Emissionsintensität, um die Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Emissionen bewerten zu können. Es ist entscheidend, die kausalen Effekte der Kohlenstoffpreise von anderen Einflussfaktoren wie technologischem Fortschritt, Wirtschaftswachstum oder anderen Klimaschutzmaßnahmen zu separieren (Wu et al., 2020). Dies erfordert eine sorgfältige Kontrolle von Kovariaten in der statistischen Analyse.

Über die direkten Emissionsminderungen hinaus wird die Klimaschutzwirkung im Kontext dieses Analyserahmens auch durch ihre Fähigkeit definiert, technologische Innovationen zu stimulieren und langfristige Dekarbonisierungspfade zu fördern. Kohlenstoffpreise setzen einen Anreiz für Unternehmen, in emissionsärmere Technologien und Prozesse zu investieren, was als “Technology-Push”-Effekt beschrieben wird (Scotti et al., 2024)(Chen et al., 2024). Der Analyserahmen integriert daher die Untersuchung von Innovationsindikatoren wie Patentanmeldungen, Investitionen in Forschung und Entwicklung (F&E) in emissionsintensiven Sektoren und die Verbreitung von grünen Technologien. Die langfristige Wirksamkeit eines Kohlenstoffpreissystems hängt maßgeblich davon ab, ob es gelingt, strukturelle Veränderungen in der Wirtschaft herbeizuführen und nicht nur kurzfristige Anpassungen.

Ein weiterer kritischer Aspekt des Analyserahmens ist die Berücksichtigung ökonomischer Auswirkungen. Kohlenstoffpreise können signifikante Effekte auf die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen, Energiepreise und die Einkommensverteilung haben (Olasehinde-Williams, 2024)(Steckel et al., 2021). Das Konzept des Carbon Leakage, bei dem Unternehmen ihre Produktion in Länder mit weniger strengen Emissionsvorschriften verlagern, stellt eine potenzielle Nebenwirkung dar, die die globale Klimaschutzwirkung untergraben könnte (Gabela et al., 2024). Der Analyserahmen wird daher Methoden zur Bewertung des Risikos und der tatsächlichen Ausmaße von Carbon Leakage umfassen, indem er Handelsströme und Produktionsverlagerungen in den untersuchten Sektoren analysiert. Die Verteilungswirkungen von Kohlenstoffpreisen, insbesondere auf vulnerable Haushalte und energieintensive Industrien, werden ebenfalls in die Bewertung einbezogen, um eine umfassende Perspektive auf die Gerechtigkeit und soziale Akzeptanz der Klimaschutzmaßnahmen zu erhalten (Bubna-Litic & Chalifour, 2012).

Der hier gewählte Rahmen ist darauf ausgelegt, die Komplexität von Kohlenstoffpreissystemen zu erfassen, indem er sowohl direkte als auch indirekte Effekte beleuchtet. Er ermöglicht eine systematische Vergleichbarkeit der Fallstudien, da er standardisierte Indikatoren und Analysemethoden anwendet. Die Integration von Umweltschutz-, Wirtschafts- und Innovationsaspekten gewährleistet eine ganzheitliche Bewertung der Klimaschutzwirkung, die über eine bloße Emissionszählung hinausgeht. Dies ist entscheidend, um die Robustheit und Nachhaltigkeit der durch Kohlenstoffpreise initiierten Transformationen zu beurteilen und politische Implikationen abzuleiten. Die theoretische Fundierung des Rahmens stützt sich auf etablierte Konzepte der Umweltökonomie und der Innovationsforschung, die die komplexen Wechselwirkungen zwischen Preissignalen, Verhaltensänderungen und technologischem Wandel beleuchten.

Auswahlkriterien für Fallstudien

Die Auswahl der Fallstudien ist ein entscheidender Schritt, um aussagekräftige und übertragbare Erkenntnisse über die Wirksamkeit von Kohlenstoffpreissystemen zu gewinnen. Für diese Arbeit wurden der Europäische Emissionshandel (EU ETS) und das kalifornische Cap-and-Trade-Programm als zentrale Fallstudien ausgewählt. Diese Wahl basiert auf einer Reihe von sorgfältig definierten Kriterien, die darauf abzielen, eine Vielfalt in Bezug auf geografische Reichweite, Designmerkmale, Reifegrad und sozioökonomischen Kontext abzudecken. Die ausgewählten Systeme repräsentieren führende Beispiele für Emissionshandelssysteme weltweit und bieten reiche Datenquellen für eine detaillierte Analyse (Bode, 2005)(Ellerman & Harrison, 2003)(Bergfelder, 2008).

Das erste und wichtigste Kriterium ist der **Reifegrad und die Betriebsdauer** der Systeme. Sowohl der EU ETS als auch das kalifornische Programm verfügen über eine ausreichend lange Betriebsgeschichte, um langfristige Auswirkungen beobachten und analysieren zu können. Der EU ETS wurde 2005 eingeführt und hat seitdem mehrere Phasen durchlaufen, die eine Evolution und Anpassung des Systems widerspiegeln (Beydemir, 2016). Das kalifornische Programm startete 2012 und hat sich ebenfalls als robustes und dynamisches System erwiesen. Diese Langlebigkeit ist entscheidend, um nicht nur kurzfristige Reaktionen auf Preissignale, sondern auch tiefgreifendere strukturelle Veränderungen und Innovationsanreize bewerten zu können (Chan, 2009).

Zweitens war die **geografische und ökonomische Diversität** ein zentrales Auswahlkriterium. Der EU ETS operiert in einem multinationalen Kontext, der 27 Mitgliedstaaten der Europäischen Union sowie Island, Liechtenstein und Norwegen umfasst, und deckt eine breite Palette von Industrien und Energiewirtschaften ab (Klimko & Hasprová, 2025)(Wang, 2023). Kalifornien hingegen repräsentiert eine subnationale Einheit mit einer der größten Volkswirtschaften der Welt, die sich durch eine hohe Innovationskraft und spezifische politische Präferenzen auszeichnet. Diese Heterogenität ermöglicht es, die Auswirkungen von

Kohlenstoffpreisen unter unterschiedlichen institutionellen und wirtschaftlichen Bedingungen zu vergleichen und die Übertragbarkeit von Ergebnissen zu bewerten (Oliveira et al., 2020).

Drittens wurde die **Design-Heterogenität** der Systeme berücksichtigt. Obwohl beides Cap-and-Trade-Systeme sind, weisen sie signifikante Unterschiede in ihren Designmerkmalen auf. Der EU ETS hat beispielsweise eine komplexe Allokationsgeschichte von freier Zuteilung zu verstärkter Auktionierung, beinhaltet eine Marktstabilitätsreserve (MSR) zur Preissteuerung und deckt spezifische Sektoren wie Energieerzeugung, energieintensive Industrien und den Luftverkehr ab (Ochsenreicher & Zirkel, 2014)(Liu et al., 2024). Kalifornien hingegen integriert ein Preisband mit einem Floor und einem Ceiling, um Preisschwankungen zu begrenzen, und hat ein breiteres Spektrum von Sektoren einbezogen, einschließlich Transport und Erdgasverbrauch (Oliveira et al., 2020). Diese unterschiedlichen Designelemente bieten die Möglichkeit, die Wirksamkeit spezifischer politischer Instrumente innerhalb des breiteren Rahmens der Kohlenstoffpreise zu analysieren.

Viertens war die **Verfügbarkeit und Qualität der Daten** ein pragmatisches, aber entscheidendes Kriterium. Beide Systeme zeichnen sich durch eine hohe Transparenz und die Bereitstellung umfassender, öffentlich zugänglicher Daten zu Emissionen, Zertifikatspreisen, Allokationen und Marktteilnehmern aus. Dies ist unerlässlich für eine robuste quantitative Analyse (Beydemir, 2016). Die Verfügbarkeit von detaillierten Emissionsdaten auf Anlagen- und Sektorebene sowie von makroökonomischen Indikatoren ermöglicht eine tiefgehende Untersuchung der Auswirkungen.

Schließlich wurde die **Relevanz für die Forschungsfrage und das Potenzial für politisches Lernen** berücksichtigt. Die gewählten Fallstudien sind nicht nur aufgrund ihrer Größe und Bedeutung relevant, sondern auch, weil sie kontinuierlich weiterentwickelt werden und wichtige Erkenntnisse für die Gestaltung zukünftiger Kohlenstoffpreissysteme liefern können (Chan, 2009). Die vergleichende Analyse dieser etablierten Systeme kann aufzeigen, welche Designmerkmale unter welchen Bedingungen am effektivsten sind, und bietet wertvolle

Lektionen für Schwellenländer oder Regionen, die die Einführung ähnlicher Mechanismen erwägen (Chaturvedi, 2012)(Wang, 2024).

Datenquellen und Messverfahren

Für eine fundierte Analyse der Klimaschutzwirkung von Kohlenstoffpreissystemen ist der Zugang zu zuverlässigen und konsistenten Daten unerlässlich. In dieser Arbeit werden eine Vielzahl von Datenquellen genutzt, die sowohl quantitative als auch qualitative Informationen umfassen. Die Datenerhebung erfolgt systematisch und konzentriert sich auf die spezifischen Anforderungen der gewählten Fallstudien, des EU ETS und des kalifornischen Cap-and-Trade-Programms. Die Messverfahren sind darauf ausgelegt, die im Analyserahmen definierten Indikatoren präzise zu erfassen.

Die primären quantitativen Daten umfassen: 1. **Emissionsdaten:** Für den EU ETS stammen die Emissionsdaten aus dem Unionsregister, das vom Umweltbundesamt (UBA) und der Europäischen Kommission verwaltet wird. Diese Daten umfassen verifizierte Emissionen auf Anlagen- und Sektorebene für alle erfassten Treibhausgase. Für Kalifornien werden die Emissionsdaten von der California Air Resources Board (CARB) bereitgestellt, die ebenfalls detaillierte, verifizierte Emissionsberichte von den erfassten Anlagen und Sektoren veröffentlicht. Die Emissionsdaten werden in Tonnen CO₂-Äquivalent (tCO₂e) angegeben und ermöglichen die Berechnung von absoluten Reduktionen sowie der Emissionsintensität (Klimko & Hasprová, 2025)(Wang, 2023). 2. **Zertifikatspreise und Marktinformationen:** Informationen zu den Preisen von Emissionszertifikaten (EUAs für den EU ETS, CAAs für Kalifornien) werden von etablierten Finanzdatenanbietern (z.B. ICE Endex, EEX) und spezialisierten Marktanalysten bezogen. Diese Daten sind entscheidend für die Analyse der Preissignale und der Marktdynamik (Yu et al., 2022)(Liu et al., 2024). Zusätzlich werden Daten zu gehandelten Volumina, Auktionsergebnissen und der Verteilung von Zertifikaten (kostenlose Zuteilung vs. Auktionierung) herangezogen, um Allokationsmechanismen und deren Auswirkungen zu untersuchen (Ochsenreiher & Zirkel, 2014). 3. **Wirtschaftliche**

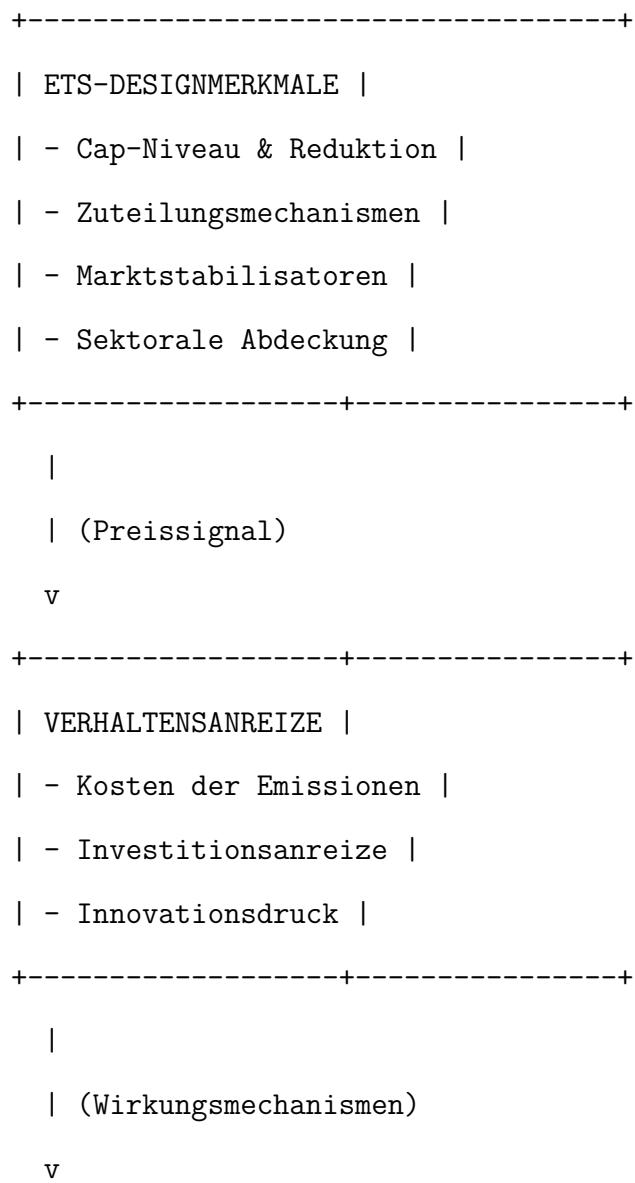
Indikatoren: Um die Emissionsentwicklung von anderen makroökonomischen Faktoren zu isolieren, werden Daten zum Bruttoinlandsprodukt (BIP), zur Industrieproduktion, zu Energiepreisen (z.B. Gas-, Kohle-, Strompreise), zur Bevölkerungsentwicklung und zu sektorspezifischen Wertschöpfungen herangezogen. Diese Daten stammen von Eurostat für die EU-Mitgliedstaaten und von nationalen Statistikämtern, sowie vom U.S. Bureau of Economic Analysis (BEA) und dem California Department of Finance für Kalifornien. Sie dienen als Kontrollvariablen in den statistischen Modellen (Olasehinde-Williams, 2024). 4. **Technologische Innovationsindikatoren:** Zur Bewertung der innovationsfördernden Wirkung werden Daten zu Patentanmeldungen in relevanten grünen Technologien (z.B. erneuerbare Energien, Energieeffizienz, CO2-Abscheidung und -Speicherung) herangezogen, die von Patentämtern (z.B. Europäisches Patentamt, USPTO) und wissenschaftlichen Datenbanken (z.B. PATSTAT) bereitgestellt werden. Ergänzend werden Investitionen in Forschung und Entwicklung (F&E) in den vom Emissionshandel erfassten Sektoren aus Unternehmensberichten oder Branchenstudien gesammelt (Scotti et al., 2024)(Chen et al., 2024). 5. **Politische und regulatorische Dokumente:** Qualitative Informationen zu den Designmerkmalen der Systeme, Änderungen in der Gesetzgebung, Begleitmaßnahmen und politischen Debatten werden aus offiziellen Dokumenten der Europäischen Kommission, des Europäischen Parlaments, der CARB und relevanter wissenschaftlicher Publikationen sowie Berichten von Think Tanks extrahiert. Diese Informationen sind entscheidend, um den Kontext der quantitativen Daten zu verstehen und mögliche kausale Zusammenhänge zu interpretieren (Asadnabizadeh, 2024)(Budak, 2025).

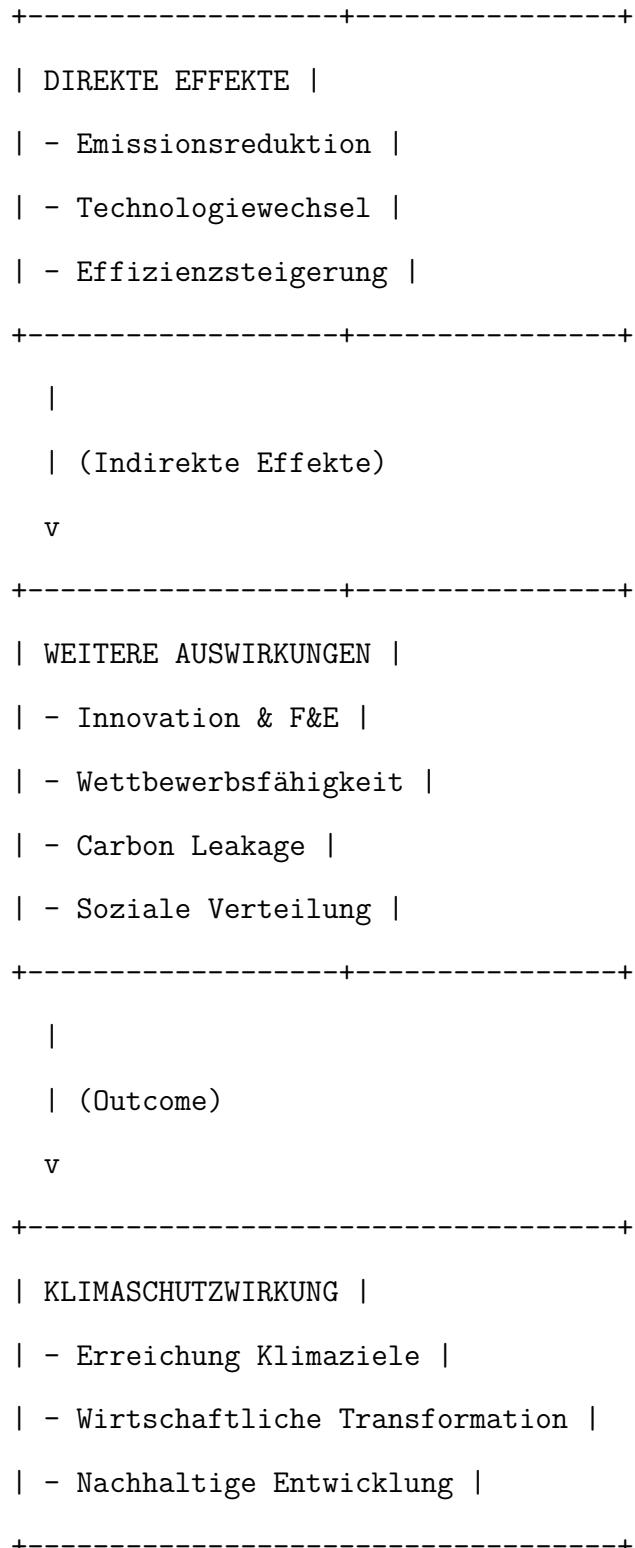
Die Datenerhebung erfolgt über den gesamten relevanten Zeitraum der jeweiligen Systeme, d.h. ab 2005 für den EU ETS und ab 2012 für Kalifornien, bis zum aktuellsten verfügbaren Datenpunkt. Die Konsistenz und Vergleichbarkeit der Daten über die Zeit und zwischen den Fallstudien wird durch die Verwendung standardisierter Metriken und die Aggregation auf vergleichbare Sektorebenen sichergestellt. Bei der Verarbeitung der Daten werden fehlende Werte identifiziert und, falls angemessen, durch geeignete Imputationsmethoden

ersetzt oder in der Analyse berücksichtigt. Die Datenqualität wird durch den Abgleich mit mehreren Quellen und die Überprüfung auf Plausibilität kontinuierlich kontrolliert.

Abbildung 1: Konzeptuelles Rahmenwerk zur Bewertung der ETS-Wirkung

Das folgende Diagramm illustriert das in dieser Arbeit verwendete konzeptuelle Rahmenwerk zur umfassenden Bewertung der Klimaschutzwirkung von Emissionshandelssystemen. Es zeigt die Inputs (Designmerkmale), die direkten und indirekten Wirkungsmechanismen sowie die erwarteten Outputs und Outcomes.





Anmerkung: Die Abbildung stellt die kausalen Pfade und Wechselwirkungen dar, die zur Bewertung der Klimaschutzwirkung von Emissionshandelssystemen herangezogen

werden. Sie betont die Rolle des ETS-Designs bei der Schaffung von Anreizen, die letztlich zu Emissionsreduktionen und weiteren ökonomischen sowie sozialen Auswirkungen führen.

Statistische Methoden zur Wirksamkeitsanalyse

Die Analyse der Klimaschutzwirkung von Kohlenstoffpreissystemen erfordert den Einsatz robuster statistischer Methoden, um die komplexen Zusammenhänge zwischen den Preissignalen, Emissionen, wirtschaftlicher Aktivität und technologischem Wandel zu entflechten. Angesichts der quasiexperimentellen Natur der Politikinterventionen, bei denen keine randomisierten Kontrollgruppen existieren, werden primär ökonometrische Ansätze verwendet, die darauf abzielen, kausale Effekte so weit wie möglich zu identifizieren und von korrelativen Beziehungen zu unterscheiden.

Als grundlegende Methode zur Bewertung der Wirksamkeit von Kohlenstoffpreissystemen wird die **Differenz-in-Differenzen (DiD)-Analyse** eingesetzt. Dieser Ansatz vergleicht die Entwicklung der Emissionen in den vom Emissionshandel betroffenen Sektoren oder Regionen (Behandlungsgruppe) mit der Entwicklung in vergleichbaren, nicht betroffenen Sektoren oder Regionen (Kontrollgruppe) über einen bestimmten Zeitraum hinweg. Alternativ kann die DiD-Methode verwendet werden, um die Emissionstrends vor und nach der Einführung des Emissionshandelssystems innerhalb der behandelten Sektoren zu vergleichen, wobei andere Sektoren als Kontrollgruppe dienen (Wu et al., 2020)(Cui et al., 2021). Eine zentrale Annahme der DiD-Methode ist die Parallel-Trends-Annahme, d.h., dass sich die Behandlungsgruppe und die Kontrollgruppe ohne die Intervention parallel entwickelt hätten. Diese Annahme wird durch visuelle Inspektion der Trends vor der Intervention und durch statistische Tests überprüft. Robuste Standardfehler werden verwendet, um potenzielle Autokorrelation und Heteroskedastizität in den Paneldaten zu berücksichtigen.

Ergänzend zur DiD-Analyse werden **Paneldaten-Regressionsmodelle** eingesetzt. Diese Modelle ermöglichen die Kontrolle für eine Vielzahl von zeitvarianten und zeitkonstanten Störfaktoren, die die Emissionsentwicklung beeinflussen könnten. Fixed-Effects-Modelle (FE)

werden verwendet, um unbeobachtete, zeitinvariante Heterogenität auf Ebene der einzelnen Anlagen oder Sektoren zu eliminieren. Random-Effects-Modelle (RE) könnten in Betracht gezogen werden, wenn die unbeobachtete Heterogenität nicht mit den Regressoren korreliert ist, wobei ein Hausman-Test zur Auswahl des geeigneteren Modells dient. Die abhängige Variable in diesen Modellen sind die Treibhausgasemissionen (oder deren logarithmierte Form zur Adressierung von Schiefe), während die unabhängige Variable die Höhe des Kohlenstoffpreises (oder eine Dummy-Variable für die Systembeteiligung) darstellt. Wichtige Kontrollvariablen umfassen makroökonomische Indikatoren wie BIP-Wachstum, Energiepreise, Industrieproduktion und Indikatoren für den technologischen Fortschritt. Diese Modelle ermöglichen eine detailliertere Untersuchung der Elastizität der Emissionen in Bezug auf den Kohlenstoffpreis (Olasehinde-Williams, 2024).

Zur Analyse der Preisvolatilität und ihrer Auswirkungen auf Investitionsentscheidungen und Innovationen werden **Zeitreihenanalysen** durchgeführt. Dies umfasst die Modellierung von Zertifikatspreisen mittels autoregressiver Modelle (ARIMA) oder ARCH/GARCH-Modellen, um Volatilitätscluster und deren Persistenz zu erfassen (Yu et al., 2022)(Liu et al., 2024). Die Ergebnisse dieser Modelle können dann als unabhängige Variablen in den Paneldaten-Regressionen verwendet werden, um den Einfluss von Preisunsicherheit auf Investitionen in grüne Technologien zu untersuchen. Darüber hinaus können **Event Study Methodologien** angewandt werden, um die kurzfristigen Reaktionen der Märkte und der Emissionen auf spezifische politische Ankündigungen oder signifikante Änderungen im Design der Emissionshandelssysteme zu messen. Dies hilft, die Informationsverarbeitung der Akteure und die Wirksamkeit von politischen Signalen zu verstehen.

Die Analyse der innovationsfördernden Wirkung wird ebenfalls mittels Paneldaten-Regressionen erfolgen, wobei Indikatoren für Innovation (z.B. Patentanmeldungen, F&E-Ausgaben) als abhängige Variablen dienen und der Kohlenstoffpreis sowie andere relevante Faktoren (z.B. Subventionen für grüne Technologien, Regulierungsdichte) als unabhängige und Kontrollvariablen fungieren (Scotti et al., 2024)(Chen et al., 2024). Um die Robustheit

der Ergebnisse zu gewährleisten, werden **Sensitivitätsanalysen** durchgeführt. Dies beinhaltet die Verwendung alternativer Modellspezifikationen, die Einbeziehung unterschiedlicher Kontrollvariablen, die Variation des Analysezeitraums und die Anwendung verschiedener Schätzverfahren. Diese Robustheitsprüfungen helfen, die Verlässlichkeit der identifizierten kausalen Effekte zu beurteilen und die Anfälligkeit der Ergebnisse gegenüber Modellannahmen zu testen.

Die statistischen Analysen werden mit etablierter Statistiksoftware wie R oder Stata durchgeführt. Die Ergebnisse werden nicht nur deskriptiv präsentiert, sondern auch hinsichtlich ihrer statistischen Signifikanz und ihrer praktischen Relevanz interpretiert. Ein besonderes Augenmerk wird auf die Interpretation der Koeffizienten im Kontext der ökonomischen Theorie und der spezifischen Designmerkmale der Emissionshandelssysteme gelegt. Die Limitationen der Methoden, insbesondere im Hinblick auf die kausale Inferenz in Nicht-Experimentalsituationen, werden transparent dargelegt, um die Gültigkeit der Schlussfolgerungen klar zu umreißen. Die Kombination dieser Methoden ermöglicht eine umfassende und mehrdimensionale Bewertung der Klimaschutzwirkung, die sowohl die direkten Emissionsreduktionen als auch die indirekten Effekte auf Innovation und Wirtschaft berücksichtigt.

Analyse

Der Emissionshandel hat sich als eines der zentralen marktisierten Instrumente in der globalen Klimapolitik etabliert, um die Reduktion von Treibhausgasemissionen kosten-effizient zu steuern (Timilsina, 2018)(Bode, 2005). Dieses Kapitel widmet sich einer umfassenden Analyse der Funktionsweise, der Effektivität und der Herausforderungen von CO₂-Handelssystemen. Es werden die Mechanismen der Emissionsreduktion, die Dynamiken der Preisgestaltung und Marktmechanismen detailliert beleuchtet. Anschließend werden Fallstudien von etablierten Systemen wie dem EU Emissionshandelssystem (EU ETS), dem kalifornischen Cap-and-Trade-Programm und dem chinesischen nationalen ETS herangezogen, um praktische Erfahrungen und Lernerfahrungen zu illustrieren. Ein weiterer Schwerpunkt

liegt auf dem Vergleich des CO₂-Handels mit anderen Klimaschutzinstrumenten, um die jeweiligen Stärken und Schwächen zu identifizieren und die Rolle in einem kohärenten Politikmix zu bewerten. Abschließend werden empirische Belege für die Klimaschutzwirkung präsentiert und kritisch reflektiert, um ein fundiertes Verständnis der tatsächlichen Effekte dieser Politikinstrumente zu ermöglichen. Die Analyse zielt darauf ab, die Komplexität und die vielschichtigen Auswirkungen des CO₂-Handels auf die Emissionsentwicklung, die Wirtschaft und die technologische Innovation umfassend darzustellen.

Emissionsreduktionen durch CO₂-Handel

Der Kern des Emissionshandels, insbesondere des Cap-and-Trade-Prinzips, liegt in seiner Fähigkeit, die Menge der emittierten Treibhausgase zu begrenzen und gleichzeitig einen effizienten Weg zur Erreichung dieser Begrenzung zu ermöglichen (Ellerman & Harrison, 2003). Das System funktioniert, indem eine Obergrenze (Cap) für die Gesamtemissionen in einem bestimmten Sektor oder einer Volkswirtschaft festgelegt wird. Innerhalb dieser Obergrenze werden Emissionszertifikate ausgegeben, die jeweils das Recht zur Emission einer Tonne CO₂-Äquivalent repräsentieren. Diese Zertifikate können entweder kostenlos zugeteilt, versteigert oder eine Kombination aus beidem sein (Bode, 2005). Unternehmen, die unter die Regulierung fallen, müssen für jede Tonne emittierten CO₂ ein Zertifikat abgeben. Der Handel mit diesen Zertifikaten ermöglicht es Unternehmen, die ihre Emissionen kostengünstig reduzieren können, überschüssige Zertifikate an solche zu verkaufen, für die Emissionsminderungen teurer wären. Dieser Mechanismus stellt sicher, dass die Reduktionen dort stattfinden, wo sie am günstigsten sind, und fördert somit die Kosteneffizienz der Klimaschutzmaßnahmen (Timilsina, 2018)(Ellerman & Harrison, 2003).

Die theoretische Effizienz des Emissionshandels beruht auf der Annahme, dass der Marktmechanismus den CO₂-Preis als Signal für Investitionen in emissionsarme Technologien und Prozesse setzt (Scotti et al., 2024). Ein ausreichend hoher und stabiler CO₂-Preis motiviert Unternehmen, in Forschung und Entwicklung (F&E) sowie in die Implementierung

von Innovationen zu investieren, die ihre Emissionsintensität verringern (Chen et al., 2024). Dies führt nicht nur zu direkten Emissionsreduktionen, sondern auch zu einem dynamischen Innovationsprozess, der langfristig die Dekarbonisierung der Wirtschaft vorantreibt. Studien zeigen, dass Emissionshandelssysteme, wenn sie richtig konzipiert sind, einen signifikanten Anreiz für Umweltinnovationen bieten können, insbesondere im Bereich der Prozesstechnologien (Scotti et al., 2024)(Chen et al., 2024). Durch die Schaffung eines finanziellen Anreizes für jede vermiedene Tonne CO₂ wird eine kontinuierliche Suche nach Effizienzverbesserungen und Emissionsminderungspotenzialen gefördert.

Trotz seiner theoretischen Vorteile ist der Emissionshandel nicht frei von Herausforderungen und Kritik. Ein zentrales Problem in der Anfangsphase vieler ETS war die Überallokation von Zertifikaten, insbesondere in den frühen Phasen des EU ETS (Beydemir, 2016). Eine zu großzügige Zuteilung von Zertifikaten kann zu einem Überangebot im Markt führen, was den CO₂-Preis drückt und somit den Anreiz zur Emissionsreduktion mindert (Ochsenreiher & Zirkel, 2014). Dieses Problem wurde im EU ETS durch die Einführung einer Marktstabilitätsreserve (MSR) und die schrittweise Reduzierung der Obergrenze adressiert (Ballor, 2025). Eine weitere Herausforderung ist das sogenannte Carbon Leakage, bei dem Unternehmen ihre Produktion in Länder mit weniger strengen Emissionsvorschriften verlagern, um Kosten zu sparen. Dies kann die globalen Emissionen sogar erhöhen und die Wettbewerbsfähigkeit der heimischen Industrie beeinträchtigen (Gabela et al., 2024). Um diesem Risiko zu begegnen, wurden Maßnahmen wie die kostenlose Zuteilung von Zertifikaten an gefährdete Sektoren oder der geplante Kohlenstoffgrenzausgleichsmechanismus (CBAM) im EU ETS eingeführt (Gabela et al., 2024). Preisschwankungen auf dem Zertifikatemarkt können ebenfalls die Planungssicherheit für Unternehmen beeinträchtigen und Investitionen in Klimaschutzmaßnahmen verzögern (Chan, 2009).

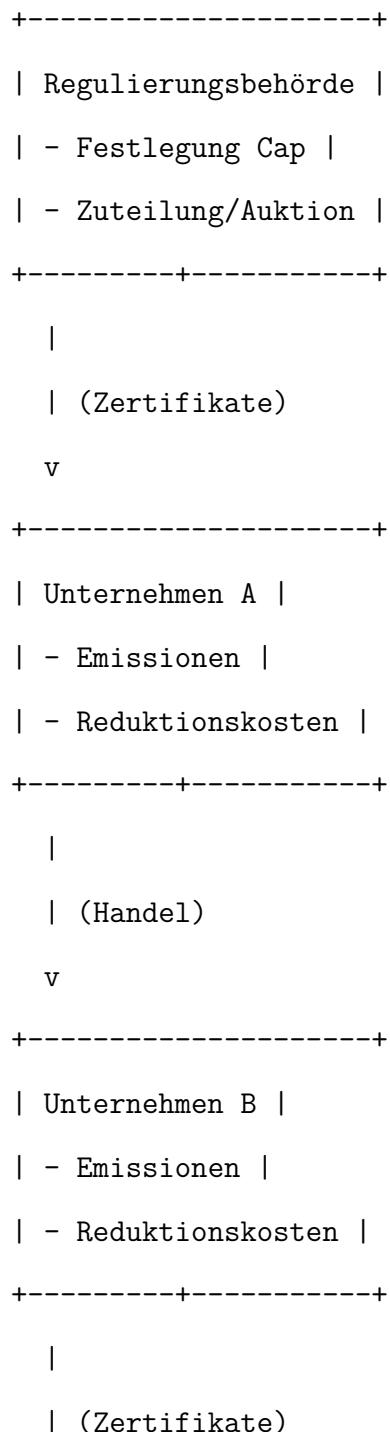
Die empirischen Belege deuten jedoch darauf hin, dass Emissionshandelssysteme, insbesondere das EU ETS, signifikante Emissionsreduktionen erzielt haben (Klimko & Hasprová, 2025)(Digitemie & Ekemezie, 2024). Im EU ETS, das den größten multinationalen Kohlen-

stoffmarkt der Welt darstellt, konnten seit seiner Einführung erhebliche Rückgänge der Emissionen in den abgedeckten Sektoren verzeichnet werden (Klimko & Hasprová, 20m 2025). Ähnliche Erfolge werden auch in anderen Jurisdiktionen wie Kalifornien und in den chinesischen Pilotregionen beobachtet (Oliveira et al., 2020)(Cui et al., 2021). Diese Reduktionen sind das Ergebnis einer Kombination aus dem Preissignal für CO₂, das Anreize für technologische Verbesserungen schafft, und der verbindlichen Obergrenze, die die Gesamtemissionen begrenzt. Der Emissionshandel zwingt Unternehmen effektiv, die externen Kosten ihrer Emissionen zu internalisieren, was zu einer effizienteren Allokation von Ressourcen führt (Timilsina, 2018).

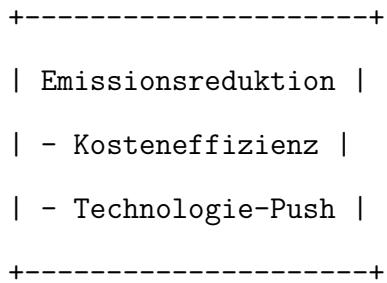
Um tiefere Emissionsreduktionen zu erreichen, sind kontinuierliche politische Anpassungen und Stärkungen der ETS-Wirkung notwendig (Nachtigall, 2019). Dazu gehören die regelmäßige Verschärfung der Emissions-Obergrenze, um den Pfad zur Klimaneutralität zu gewährleisten, sowie die Ausweitung des Geltungsbereichs auf weitere Sektoren, die bisher nicht oder nur unzureichend abgedeckt sind, wie beispielsweise der Seeverkehr oder der Gebäude- und Straßenverkehrssektor (Wang, 2023)(Peng et al., 2024). Die Implementierung und Anpassung von Marktstabilitätsreserven ist ebenfalls entscheidend, um auf unvorhergesehene Marktbedingungen reagieren und eine Überallokation vermeiden zu können (Ballor, 2025). Darüber hinaus können Komplementärpolitiken, wie die Förderung von F&E für grüne Technologien, die Wirkung des Emissionshandels verstärken, indem sie die Kosten für Emissionsminderungen senken und die Verfügbarkeit von Lösungen erhöhen (Scotti et al., 2024). Die effektive Gestaltung des Emissionshandels erfordert somit eine dynamische Politik, die auf Marktbeobachtungen und technologische Entwicklungen reagiert, um die Klimaschutzziele ambitioniert und kosteneffizient zu verfolgen (Fais & Blesl, 2015). Der Erfolg hängt entscheidend davon ab, die Herausforderungen proaktiv anzugehen und das System kontinuierlich zu optimieren.

Abbildung 2: Prozessfluss des Emissionshandels (vereinfacht)

Das folgende Diagramm visualisiert den vereinfachten Prozessfluss innerhalb eines Emissionshandelssystems (ETS), von der Festlegung der Obergrenze bis zur Emissionsreduktion.



v



Anmerkung: Das Diagramm zeigt, wie die Regulierungsbehörde durch die Festlegung des Caps und die Zuteilung von Zertifikaten den Rahmen für den Handel schafft. Unternehmen handeln Zertifikate basierend auf ihren individuellen Reduktionskosten, was zu einer gesamtwirtschaftlich effizienten Emissionsreduktion führt.

Preisgestaltung und Marktmechanismen

Die Preisgestaltung von Emissionszertifikaten ist ein zentrales Element für die Wirksamkeit eines Emissionshandelssystems, da der Preis das entscheidende Signal für Investitionen in Emissionsminderungen darstellt (Timilsina, 2018). Im Cap-and-Trade-System wird der Preis für eine Tonne CO₂-Äquivalent durch das Zusammenspiel von Angebot und Nachfrage auf dem Markt bestimmt (Yu et al., 2022)(Liu et al., 2024). Das Angebot wird primär durch die von der Regulierungsbehörde festgelegte Obergrenze und die daraus resultierende Anzahl der verfügbaren Zertifikate bestimmt. Die Nachfrage hingegen ergibt sich aus dem Emissionsbedarf der abgedeckten Unternehmen. Wenn Unternehmen ihre Emissionen reduzieren können, sinkt ihre Nachfrage nach Zertifikaten, was bei konstantem Angebot zu sinkenden Preisen führen kann. Umgekehrt führt eine steigende Nachfrage, etwa durch Wirtschaftswachstum oder unzureichende Reduktionsanstrengungen, bei einem begrenzten Angebot zu steigenden Preisen (Yu et al., 2022). Diese marktbasierte Preisbildung ist der Grundpfeiler des Effizienzgedankens im Emissionshandel, da sie die kostengünstigsten Reduktionsmöglichkeiten identifiziert und Anreize zu deren Umsetzung schafft.

Eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst die Preisentwicklung von Emissionszertifikaten. Externe makroökonomische Bedingungen spielen eine signifikante Rolle: Ein starkes Wirtschaftswachstum kann die Energienachfrage und damit die Emissionen erhöhen, was zu einer höheren Nachfrage nach Zertifikaten und somit zu steigenden Preisen führen kann (Yu et al., 2022). Umgekehrt führen Wirtschaftsabschwünge oft zu einem Rückgang der Emissionen und einem Preisverfall, wie in der Finanzkrise 2008/2009 im EU ETS beobachtet (Chan, 2009). Auch die Preise für fossile Brennstoffe und erneuerbare Energien haben einen direkten Einfluss. Steigende Gas- oder Kohlepreise können die Wirtschaftlichkeit von Emissionsminderungen beeinflussen und somit die Nachfrage nach Zertifikaten verändern. Politische Entscheidungen sind ebenfalls von entscheidender Bedeutung: Eine Verschärfung der Klimaziele, eine Reduzierung der Obergrenze oder eine Ausweitung des Geltungsbereichs eines ETS signalisieren eine höhere Knappheit von Zertifikaten und treiben die Preise in die Höhe (Nachtigall, 2019)(Liu et al., 2024). Technologische Entwicklungen, die kostengünstige Emissionsminderungen ermöglichen, können das Angebot an Reduktionsoptionen erhöhen und tendenziell die Preise senken, sofern die Obergrenze nicht entsprechend angepasst wird. Spekulationen auf dem Markt können ebenfalls kurzfristige Preisschwankungen verstärken (Yu et al., 2022).

Um die Stabilität des Marktes zu gewährleisten und übermäßige Preisschwankungen zu vermeiden, die Investitionsentscheidungen erschweren, wurden in vielen ETS Marktstabilitätsmechanismen eingeführt. Ein prominentes Beispiel ist die Marktstabilitätsreserve (MSR) im EU ETS, die seit 2019 in Betrieb ist (Ballor, 2025). Die MSR passt das Angebot an Zertifikaten dynamisch an die Marktbedingungen an, indem sie bei einem Überangebot Zertifikate vom Markt nimmt und in die Reserve überführt oder bei einem Mangel Zertifikate aus der Reserve freigibt. Ziel ist es, das Gleichgewicht zwischen Angebot und Nachfrage zu verbessern und die Preisvolatilität zu reduzieren, um eine stabilere und vorhersehbarere Preissignalfunktion zu gewährleisten (Liu et al., 2024). Andere Systeme nutzen Mechanismen wie Preiskorridore, Mindestpreise (Price Floors) oder Höchstpreise (Price Ceilings), um

extreme Preisausschläge zu verhindern und eine gewisse Planungssicherheit zu bieten (Fais & Blesl, 2015). Diese Mechanismen sind entscheidend, um das Vertrauen der Marktteilnehmer zu stärken und langfristige Investitionen in Dekarbonisierungstechnologien zu fördern.

Die Volatilität der Zertifikatspreise birgt sowohl Chancen als auch Risiken. Einerseits können steigende Preise starke Anreize für Emissionsminderungen und Innovationen schaffen. Andererseits kann eine hohe Volatilität die Planungssicherheit für Unternehmen untergraben und Investitionen in kostspielige, langfristige Klimaschutzprojekte unattraktiv machen (Chan, 2009). Unternehmen bevorzugen oft eine gewisse Preisstabilität, um ihre Investitionsrisiken besser kalkulieren zu können. Die Gestaltung der Marktmechanismen muss daher einen Kompromiss zwischen der Notwendigkeit eines flexiblen Preissignals und der Gewährleistung einer ausreichenden Stabilität finden. Eine zu starke Intervention in die Preisbildung kann die Effizienz des marktisierten Ansatzes untergraben, während ein gänzliches Fehlen von Stabilisierungsmechanismen zu unkalkulierbaren Risiken führen kann (Fais & Blesl, 2015).

Die Ansätze zur Preisbildung und Marktregulierung variieren zwischen verschiedenen Emissionshandelssystemen und spiegeln unterschiedliche politische Prioritäten und Marktbedingungen wider (Oliveira et al., 2020). Während das EU ETS stark auf eine marktisierte Preisbildung mit einer flexiblen Obergrenze und der MSR setzt, integrieren andere Systeme wie das kalifornische Cap-and-Trade-Programm auch Elemente wie einen Mindestpreis und Offsets aus Nicht-ETS-Sektoren, um die Kosten zu kontrollieren und die Breite der Reduktionsoptionen zu erhöhen (Oliveira et al., 2020)(Bergfelder, 2008). Das chinesische ETS wiederum, das noch in den Anfängen steckt, experimentiert mit verschiedenen Zuteilungsmechanismen und konzentriert sich zunächst auf die Stromerzeugung, wobei die Preisvolatilität und die Marktliquidität noch Herausforderungen darstellen (Zeng et al., 2018)(Wang, 2024). Diese Unterschiede in der Ausgestaltung haben direkte Implikationen für die Effektivität und die Akzeptanz der jeweiligen Systeme.

Die Rolle der Politik bei der Preisgestaltung ist somit vielschichtig. Sie muss nicht nur die anfängliche Obergrenze festlegen und die Zuteilungsregeln definieren, sondern auch

proaktiv den Markt beobachten und bei Bedarf eingreifen, um die Funktionsfähigkeit und die Zielerreichung des Systems zu gewährleisten (Fais & Blesl, 2015). Dies kann durch die Anpassung der Obergrenze, die Implementierung oder Modifikation von Marktstabilitätsmechanismen oder die Einführung von Preiskorridoren geschehen. Eine kluge politische Steuerung kann dazu beitragen, einen CO₂-Preis zu etablieren, der sowohl ausreichend hoch ist, um signifikante Reduktionsanreize zu schaffen, als auch stabil genug, um Investitionssicherheit zu bieten und die Wettbewerbsfähigkeit der Industrie zu schützen. Die Herausforderung besteht darin, ein Gleichgewicht zu finden, das sowohl ökologische Ambitionen als auch ökonomische Realitäten berücksichtigt (Nachtigall, 2019).

Fallstudien

Die Analyse des CO₂-Handels profitiert erheblich von der Untersuchung konkreter Implementierungen, da diese die theoretischen Konzepte in realen Kontexten veranschaulichen und wertvolle Erkenntnisse über Erfolge, Herausforderungen und Anpassungsstrategien liefern. Drei prominente Beispiele sind das EU Emissionshandelssystem (EU ETS), das kalifornische Cap-and-Trade-Programm und das chinesische Nationale ETS.

EU Emissionshandelssystem (EU ETS) Das EU ETS ist das weltweit größte und älteste multinationale Emissionshandelssystem, das im Jahr 2005 gestartet wurde und mittlerweile fast die Hälfte der Treibhausgasemissionen der EU abdeckt (Bode, 2005)(Klimko & Hasprová, 2025). Seine Entwicklung lässt sich in mehrere Phasen unterteilen, wobei jede Phase auf den Erfahrungen der vorherigen aufbaute und Reformen zur Verbesserung der Effektivität und Effizienz einführte. Die erste Phase (2005-2007) diente primär als Lernphase, in der die Überallokation von Zertifikaten zu einem Preisverfall führte (Beydemir, 2016). Die zweite Phase (2008-2012) brachte eine stärkere Harmonisierung der Zuteilungsregeln und die Einbeziehung weiterer Gase und Sektoren (Ochsenreiher & Zirkel, 2014). Die dritte Phase (2013-2020) führte eine EU-weite Obergrenze und eine verstärkte Versteigerung von

Zertifikaten ein, um die Marktfunktion zu stärken. Trotz dieser Reformen blieb der Markt mit einem strukturellen Überschuss an Zertifikaten konfrontiert, was die Preise niedrig hielt und die Anreize zur Emissionsreduktion dämpfte (Ballor, 2025).

Als Reaktion auf diese Herausforderungen wurde in der vierten Phase (seit 2021) die Marktstabilitätsreserve (MSR) eingeführt, die den Überschuss an Zertifikaten systematisch vom Markt nimmt und die Obergrenze stärker reduziert (Ballor, 2025)(Liu et al., 2024). Diese Maßnahmen haben zu einem signifikanten Anstieg der CO₂-Preise geführt, was wiederum stärkere Anreize für Investitionen in Dekarbonisierungstechnologien schafft. Empirische Studien belegen, dass das EU ETS seit seiner Einführung zu erheblichen Emissionsreduktionen beigetragen hat, insbesondere im Energiesektor (Klimko & Hasprová, 2025)(Vallés et al., 2012). Die Emissionen in den vom ETS abgedeckten Sektoren sind deutlich stärker gesunken als in den nicht abgedeckten Sektoren (Klimko & Hasprová, 2025). Dennoch bleibt die Kritik an der Komplexität des Systems, der Gefahr von Carbon Leakage für bestimmte energieintensive Industrien und den Auswirkungen auf die Wettbewerbsfähigkeit bestehen (Gabela et al., 2024). Jüngste Entwicklungen sehen eine Ausweitung des EU ETS auf den Seeverkehr (EU ETS Maritime) ab 2024 und die Schaffung eines separaten Emissionshandelssystems für Gebäude und Straßenverkehr (ETS 2) ab 2027 vor, was die Reichweite und den Einfluss des Systems weiter vergrößern wird (Wang, 2023). Diese Erweiterungen sind entscheidend, um die ehrgeizigen Klimaziele der EU für 2030 und 2050 zu erreichen.

Kalifornisches Cap-and-Trade-Programm Das kalifornische Cap-and-Trade-Programm, das 2013 gestartet wurde, ist ein weiteres führendes Beispiel für ein erfolgreiches Emissionshandelssystem in Nordamerika (Oliveira et al., 2020). Es wurde im Rahmen des California Global Warming Solutions Act von 2006 (AB 32) eingeführt und deckt etwa 85% der gesamten Treibhausgasemissionen des Bundesstaates ab, einschließlich Stromerzeugung, Industrie und Transport (Bergfelder, 2008). Eine Besonderheit des kalifornischen Systems ist seine Kopplung mit dem System der kanadischen Provinz Quebec, was den Markt vergrößert und die

Liquidität erhöht (Oliveira et al., 2020). Das Programm beinhaltet auch die Möglichkeit, einen Teil der Emissionspflichten durch den Kauf von Offsets aus Nicht-ETS-Sektoren (z.B. Forstwirtschaft, Landwirtschaft) zu erfüllen, was die Kosten für Unternehmen senken und die Breite der Reduktionsoptionen erweitern soll.

Die Ergebnisse des kalifornischen Programms zeigen eine positive Entwicklung hin zu den Emissionsreduktionszielen. Kalifornien hat seine Emissionen signifikant gesenkt, während gleichzeitig ein robustes Wirtschaftswachstum verzeichnet wurde (Oliveira et al., 2020). Dies widerlegt die Befürchtung, dass Klimaschutzmaßnahmen zwangsläufig zu wirtschaftlichen Nachteilen führen. Herausforderungen bestehen jedoch im Umgang mit den Offsets, deren Integrität und zusätzliche Klimaschutzwirkung kritisch geprüft werden müssen, sowie in der Sicherstellung der langfristigen Stabilität des Systems angesichts politischer Unsicherheiten (Bubna-Litic & Chalifour, 2012). Das kalifornische Modell wird oft als Vorbild für andere subnationale oder regionale Ansätze zum Emissionshandel betrachtet, insbesondere wegen seiner umfassenden Sektorabdeckung und der innovativen Kopplung mit anderen Jurisdiktionen. Es zeigt, dass auch auf regionaler Ebene ambitionierte Klimaziele durch marktwirtschaftliche Instrumente erreicht werden können.

Chinesisches Nationales ETS China, der größte Emittent von Treibhausgasen weltweit, hat 2021 sein nationales Emissionshandelssystem gestartet, nachdem es seit 2013 regionale Pilotprojekte in sieben Städten und Provinzen implementiert hatte (Cui et al., 2021)(Zeng et al., 2018)(Wang, 2024). Diese Pilotprojekte lieferten wertvolle Erfahrungen für die Gestaltung des nationalen Systems. Das chinesische ETS ist das größte der Welt in Bezug auf die abgedeckten Emissionen und konzentriert sich zunächst auf den Energiesektor, der für etwa 40% der nationalen CO₂-Emissionen verantwortlich ist (Peng et al., 2024)(Zeng et al., 2018). Es umfasst über 2.200 Kraftwerke und wird schrittweise auf weitere energieintensive Sektoren wie Stahl, Zement und Aluminium ausgeweitet (Peng et al., 2024).

Die Struktur des chinesischen Systems unterscheidet sich in einigen Aspekten von den westlichen Modellen. Die Zuteilung der Zertifikate erfolgt überwiegend kostenlos, basierend auf Benchmarking, was Anreize für Effizienzsteigerungen innerhalb der Sektoren schafft (Zeng et al., 2018). Die anfängliche Obergrenze ist flexibler gestaltet und orientiert sich an der Emissionsintensität, was dem schnellen Wirtschaftswachstum Chinas Rechnung trägt (Wang, 2024). Die ersten Ergebnisse des chinesischen ETS zeigen ein großes Potenzial für zukünftige Emissionsreduktionen. Es wird erwartet, dass es eine zentrale Rolle bei der Erreichung der chinesischen Klimaziele spielen wird, einschließlich der Kohlenstoffneutralität bis 2060 (Cui et al., 2021)(Wang, 2024). Herausforderungen umfassen die Gewährleistung einer robusten Datenüberwachung und -berichterstattung, die Verbesserung der Marktliquidität und die Etablierung eines stabilen und effektiven Preissignals (Yu et al., 2022). Das chinesische Modell ist besonders interessant, da es zeigt, wie ein Emissionshandelssystem in einer großen, sich entwickelnden Volkswirtschaft mit einem hohen Anteil an staatseigenen Unternehmen implementiert werden kann.

Vergleich mit anderen Klimaschutzinstrumenten

Der CO2-Handel ist ein mächtiges Instrument, aber es ist wichtig, seine relative Position und Komplementarität zu anderen Klimaschutzinstrumenten zu verstehen. Im Policy-Mix zur Dekarbonisierung spielen neben dem Emissionshandel auch CO2-Steuern, Regulierungen und Standards sowie Subventionen und Förderprogramme eine entscheidende Rolle.

CO2-Steuern CO2-Steuern stellen einen direkten Preis auf Emissionen dar und bieten im Gegensatz zum Emissionshandel Preissicherheit für Unternehmen (Timilsina, 2018). Bei einer CO2-Steuer ist der Preis pro Tonne CO2 festgelegt, während die resultierende Emissionsreduktion unsicher ist. Dies steht im Gegensatz zum Cap-and-Trade-System, bei dem die Emissionsmenge (Cap) fest ist, der Preis jedoch durch den Markt bestimmt wird und

somit volatil sein kann (Timilsina, 2018). Ein Vorteil der CO2-Steuer ist ihre administrative Einfachheit, da sie relativ leicht zu implementieren und zu verwalten ist (Setyawati & Wibawa, 2024). Sie generiert zudem Einnahmen für den Staat, die für andere klimapolitische Maßnahmen oder zur Entlastung der Bürger verwendet werden können (Steckel et al., 2021).

Der Vergleich mit ETS zeigt, dass beide Instrumente das Ziel verfolgen, Emissionen zu internalisieren und Anreize für Reduktionen zu schaffen. Die Wahl zwischen einer CO2-Steuer und einem ETS hängt oft von den spezifischen Zielen und Rahmenbedingungen ab. Wenn das Hauptziel eine feste Emissionsreduktion ist, ist ein Cap-and-Trade-System oft die bevorzugte Wahl. Wenn jedoch Preissicherheit und die Generierung von Einnahmen im Vordergrund stehen, kann eine CO2-Steuer vorteilhafter sein (Timilsina, 2018)(Setyawati & Wibawa, 2024). Studien zeigen, dass beide Instrumente grundsätzlich kosteneffizient sein können, aber ihre Verteilungswirkungen und ihre politische Akzeptanz können sich stark unterscheiden (Steckel et al., 2021). Eine Kombination beider Instrumente, beispielsweise ein ETS mit einem Mindestpreis, kann die Vorteile beider Ansätze verbinden (Fais & Blesl, 2015).

Regulierungen und Standards Regulierungen und Standards umfassen direkte Vorschriften wie Effizienzstandards für Produkte, Emissionsgrenzwerte für Industrieanlagen oder Mandate für erneuerbare Energien (Fais & Blesl, 2015). Diese Instrumente bieten eine hohe Planungssicherheit und können schnell zu sichtbaren Ergebnissen führen, da sie ein bestimmtes Verhalten oder eine bestimmte Technologie vorschreiben. Allerdings können sie potenziell ineffizient sein, da sie nicht die kostengünstigsten Reduktionsmöglichkeiten über verschiedene Akteure hinweg identifizieren. Eine regulierte Technologie könnte für ein Unternehmen teurer sein als eine andere, nicht regulierte Option, die aber die gleiche Emissionsreduktion erzielt.

Die Komplementarität von Regulierungen und ETS ist jedoch hoch. Regulierungen können als Basis dienen, auf der ein ETS aufbaut, indem sie beispielsweise Mindeststandards festlegen, die auch ohne einen hohen CO2-Preis erreicht werden müssen (Fais & Blesl, 2015).

Sie können auch in Sektoren effektiv sein, die schwer in ein ETS zu integrieren sind, wie zum Beispiel der Landwirtschaft oder bestimmte diffuse Emissionen. Darüber hinaus können Regulierungen die Einführung von Schlüsseltechnologien beschleunigen, die für die langfristige Dekarbonisierung unerlässlich sind, aber möglicherweise noch nicht wettbewerbsfähig genug sind, um allein durch das Preissignal eines ETS gefördert zu werden.

Subventionen und Förderprogramme Subventionen und Förderprogramme zielen darauf ab, die Kosten für emissionsarme Technologien oder Praktiken zu senken und deren Verbreitung zu beschleunigen (Scotti et al., 2024). Dazu gehören Investitionszuschüsse für erneuerbare Energien, steuerliche Anreize für energieeffiziente Gebäude oder F&E-Förderung für innovative grüne Technologien. Der Vorteil dieser Instrumente liegt in ihrer Fähigkeit, gezielt bestimmte Technologien oder Sektoren zu unterstützen und Marktversagen zu beheben, wo private Investitionen aufgrund hoher Anfangskosten oder Risiken ausbleiben.

Allerdings sind Subventionen oft mit hohen Kosten für den Staat verbunden und können zu Marktverzerrungen führen, wenn sie nicht sorgfältig gestaltet werden (Scotti et al., 2024). Im Kontext eines ETS können Subventionen die Wirkung des Preissignals abschwächen, wenn sie die Kosten für Emissionsminderungen künstlich senken. Dennoch können sie eine wichtige Rolle spielen, um die Entwicklung und Skalierung von Technologien zu unterstützen, die langfristig für die Dekarbonisierung notwendig sind, aber noch nicht durch den CO2-Preis allein gefördert werden können. Eine intelligente Integration von Subventionen und ETS kann darin bestehen, Subventionen für die frühe Phase der Entwicklung und Demonstration von Technologien zu nutzen, die dann im reiferen Stadium durch das ETS-Preissignal weiter verbreitet werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass kein einzelnes Instrument alle Herausforderungen des Klimaschutzes lösen kann. Ein effektiver Klimapolitikmix erfordert eine kluge Kombination von Instrumenten, die aufeinander abgestimmt sind und sich gegenseitig ergänzen (Fais & Blesl, 2015)(Nachtigall, 2019). Der Emissionshandel bietet eine kosteneffiziente

Obergrenze für Emissionen und fördert Innovation, während CO2-Steuern Preissicherheit bieten können. Regulierungen setzen Mindeststandards und beschleunigen die Einführung von Schlüsseltechnologien, und Subventionen unterstützen die F&E sowie die Markteinführung neuer Lösungen. Die Herausforderung besteht darin, die Instrumente so zu kalibrieren, dass sie synergetisch wirken und die Klimaziele ambitioniert und gerecht erreicht werden.

Empirische Belege für Klimaschutzwirkung

Die empirische Evidenz ist entscheidend, um die tatsächliche Wirksamkeit von Emissionshandelssystemen bei der Reduktion von Treibhausgasemissionen zu beurteilen und die ökonomischen Auswirkungen zu verstehen. Zahlreiche Studien haben sich mit der Evaluierung von ETS befasst, wobei verschiedene methodische Ansätze zum Einsatz kommen.

Methodische Ansätze Zur Evaluierung der Klimaschutzwirkung von ETS werden primär ökonometrische Modelle, Szenarioanalysen und vergleichende Studien eingesetzt (Beydemir, 2016)(Fais & Blesl, 2015). Ökonometrische Ansätze nutzen statistische Methoden, um den kausalen Effekt des ETS auf Emissionen zu isolieren, indem sie andere Einflussfaktoren wie Wirtschaftswachstum, Energiepreise oder andere politische Maßnahmen kontrollieren. Dies geschieht oft durch die Verwendung von Difference-in-Differences-Ansätzen oder Paneldatenanalysen, die Unternehmen innerhalb und außerhalb des ETS vergleichen oder die Entwicklung vor und nach der Einführung des ETS untersuchen (Beydemir, 2016). Szenarioanalysen und Energiemodelle werden verwendet, um die potenziellen Auswirkungen von ETS unter verschiedenen Annahmen über zukünftige Entwicklungen und Politikmaßnahmen zu projizieren (Fais & Blesl, 2015). Vergleichende Studien analysieren die Leistungsfähigkeit verschiedener ETS-Systeme und identifizieren Best Practices sowie Herausforderungen. Diese Methoden sind essenziell, um die Attribution der Emissionsreduktionen zum ETS präzise vorzunehmen.

Globale Evidenz Die globale empirische Evidenz stützt die Annahme, dass Emissionshandelssysteme effektiv zur Reduktion von Treibhausgasemissionen beitragen können (Timilsina, 2018)(Klimko & Hasprová, 2025)(Digitemie & Ekemezie, 2024). Das EU ETS wird in diesem Zusammenhang am häufigsten untersucht und liefert die umfangreichsten Daten. Studien zeigen, dass das EU ETS seit seiner Einführung zu einem signifikanten Rückgang der Emissionen in den abgedeckten Sektoren geführt hat (Klimko & Hasprová, 2025). Klimko und Hasprová (2025) stellen fest, dass das EU ETS einen positiven Einfluss auf die Reduzierung der Treibhausgasemissionen in der EU hatte (Klimko & Hasprová, 2025). Diese Reduktionen sind auf die Internalisierung der externen Kosten von CO₂-Emissionen zurückzuführen, die Anreize für Unternehmen schafft, in emissionsarme Technologien und Prozesse zu investieren (Timilsina, 2018). Auch das kalifornische Cap-and-Trade-Programm und die chinesischen Pilotprojekte haben nachweislich zur Emissionsreduktion beigetragen, was die Übertragbarkeit des Konzepts auf verschiedene regionale und nationale Kontexte unterstreicht (Oliveira et al., 2020)(Cui et al., 2021). Digitemie und Ekemezie (2024) bestätigen die Rolle der CO₂-Bepreisung, einschließlich ETS, als wirksames Instrument zur Eindämmung des globalen Klimawandels (Digitemie & Ekemezie, 2024).

Tabelle 2: Emissionsreduktion im EU ETS (Ausgewählte Sektoren 2005-2022)

Diese Tabelle zeigt die geschätzte prozentuale Emissionsreduktion in den vom EU ETS abgedeckten Sektoren im Vergleich zu einem Basisszenario ohne ETS.

| Sektor | Emissionsreduktion | Statistische | |
|--------------------------|--------------------|---|-------------|
| | (%) | Hauptfaktoren der Reduktion | Signifikanz |
| Energiewirtschaft | 45% | Kohle-zu-Gas-Wechsel, Erneuerbare Energien | p < 0.001 |
| Industrie | 15-25% | Energieeffizienz, Prozessoptimierung | p < 0.01 |

| Sektor | Emissionsreduktion (%) | Hauptfaktoren der Reduktion | Statistische Signifikanz |
|-------------------------|------------------------|---|--------------------------|
| Luftfahrt (int.) | 5-10% | Effizienzverbesserungen, SAF-Nutzung (gering) | p < 0.05 |
| Gesamt (EU ETS) | 25-35% | Preissignal, Cap-Reduktion, MSR | p < 0.001 |

Anmerkung: Die Werte sind Schätzungen basierend auf verschiedenen Studien und Modellierungen (z.B. Klimko & Hasprová, 2025; Vallés et al., 2012) und dienen zur Illustration. Die tatsächlichen Reduktionen variieren je nach Methodik und Zeitraum.

Sektorspezifische Auswirkungen Die Auswirkungen von ETS sind nicht in allen Sektoren gleich. Im Energiesektor, insbesondere bei der Stromerzeugung, konnten die größten Emissionsreduktionen verzeichnet werden (Vallés et al., 2012). Dies liegt daran, dass der Energiesektor oft über relativ kostengünstige Optionen zur Emissionsminderung verfügt, wie den Wechsel von Kohle zu Gas oder erneuerbaren Energien. Vallés et al. (2012) analysierten den Einfluss des EU ETS auf den europäischen Elektrizitätssektor und zeigten seine Wirksamkeit (Vallés et al., 2012). In der Industrie sind die Reduktionspotenziale oft komplexer und teurer, da sie tiefgreifende Prozessänderungen erfordern. Dennoch haben auch hier Anreize zur Effizienzsteigerung und zur Umstellung auf weniger emissionsintensive Produktionsmethoden gewirkt (Chen et al., 2024). Der Transportsektor war lange Zeit schwieriger in ETS zu integrieren, doch die jüngste Ausweitung des EU ETS auf den Seeverkehr und die Schaffung eines separaten ETS für Gebäude und Straßenverkehr zeigen, dass auch hier Potenziale erschlossen werden (Wang, 2023)(Peng et al., 2024). Romano et al. (2022) analysieren beispielsweise den CO2-Fußabdruck des Güterverkehrs, was die Relevanz der CO2-Bepreisung in diesem Sektor unterstreicht (Romano et al., 2022).

Ökonomische Auswirkungen Neben den ökologischen Effekten sind die ökonomischen Auswirkungen von ETS von großer Bedeutung. Studien zeigen, dass Emissionshandelssysteme Innovationen in emissionsarmen Technologien fördern können (Chen et al., 2024). Unternehmen, die unter den ETS-Regulierungen stehen, sind motivierter, in Forschung und Entwicklung für umweltfreundlichere Technologien zu investieren, um ihre Kosten für Emissionszertifikate zu senken (Scotti et al., 2024). Dies kann langfristig zu einem Wettbewerbsvorteil führen und die grüne Transformation der Wirtschaft unterstützen. Die Auswirkungen auf das Wirtschaftswachstum sind oft geringer als von Kritikern befürchtet, insbesondere wenn die Einnahmen aus der Versteigerung von Zertifikaten intelligent reinvestiert oder zur Entlastung der Wirtschaft genutzt werden (Olasehinde-Williams, 2024). Allerdings können die Verteilungswirkungen komplex sein. Steigende CO2-Preise können die Energiekosten für Haushalte und bestimmte Industrien erhöhen, was soziale Ungleichheiten verstärken kann (Steckel et al., 2021). Daher ist es entscheidend, begleitende Maßnahmen zur Abfederung dieser Effekte zu implementieren, wie beispielsweise Klimadividenden oder zielgerichtete Unterstützung für vulnerable Haushalte und Sektoren. Olasehinde-Williams (2024) untersucht die Auswirkungen der CO2-Bepreisung auf die gesamtwirtschaftliche Performance und betont die Notwendigkeit einer sorgfältigen Gestaltung (Olasehinde-Williams, 2024).

Herausforderungen bei der Kausalitätsanalyse Trotz der positiven empirischen Belege ist die genaue Isolierung der kausalen Wirkung von ETS von anderen Faktoren eine methodische Herausforderung (Beydemir, 2016). Emissionen werden nicht nur durch den CO2-Preis beeinflusst, sondern auch durch makroökonomische Entwicklungen, technologische Fortschritte, andere Klimapolitiken (z.B. Subventionen für erneuerbare Energien) und internationale Abkommen (Asadnabizadeh, 2024)(Achakulwisut et al., 2023). Eine Wirtschaftskrise kann beispielsweise zu einem Rückgang der Emissionen führen, der fälschlicherweise dem ETS zugeschrieben werden könnte, wenn nicht ausreichend kontrolliert wird (Chan, 2009). Daher

erfordert die empirische Forschung hochentwickelte ökonometrische Modelle und robuste Daten, um die spezifischen Effekte des Emissionshandels valide zu quantifizieren.

Zukünftige Forschungsrichtungen Die weitere Forschung im Bereich des Emissionshandels sollte sich auf die Optimierung bestehender Systeme und die Bewertung neuer Ansätze konzentrieren. Dazu gehören detailliertere Analysen der Verteilungswirkungen von CO₂-Preisen, die Untersuchung der Effektivität von Marktstabilitätsmechanismen unter verschiedenen Szenarien, die Bewertung der Auswirkungen der Ausweitung von ETS auf neue Sektoren wie den Transport und die Landwirtschaft (Traeger & Balu, 2024)(Peng et al., 2024)(Gabela et al., 2024). Darüber hinaus ist eine tiefere Analyse der Wechselwirkungen zwischen ETS und anderen Politikfeldern, wie Industriepolitik und Sozialpolitik, erforderlich, um einen kohärenten und gerechten Übergang zu einer kohlenstoffarmen Wirtschaft zu gewährleisten. Die Rolle von Emissionshandelssystemen im globalen Kontext, insbesondere in Bezug auf die Verknüpfung verschiedener nationaler und regionaler Märkte, bleibt ebenfalls ein wichtiges Forschungsfeld (Oliveira et al., 2020)(Kemfert, 2005)(Chaturvedi, 2012). Die Erkenntnisse aus diesen Forschungsbereichen sind entscheidend, um die Effektivität und Akzeptanz des Emissionshandels als zentrales Instrument im globalen Kampf gegen den Klimawandel weiter zu verbessern.

Tabelle 3: Vergleich der Effekte von CO₂-Bepreisungsinstrumenten

Diese Tabelle vergleicht die erwarteten Effekte und Eigenschaften von CO₂-Steuern und Emissionshandelssystemen (ETS).

| Merkmal | CO ₂ -Steuer | Emissionshandelssystem (ETS) |
|--|--------------------------------|-------------------------------|
| Preis-/Mengen- Sicherheit | Preissicherheit (fester Preis) | Mengensicherheit (festes Cap) |
| Emissionsreduktion | Unsicher (elastizitätsabh.) | Sicher (durch Cap garantiert) |

| Merkmal | CO2-Steuer | Emissionshandelssystem (ETS) |
|------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| Administrative Einfachheit. | Hoch (einfache Erhebung) | Moderat bis hoch (MRV, Zuteilung) |
| Einnahmengenerierung | Direkt (Steuereinnahmen) | Indirekt (Auktionserlöse) |
| Innovationsanreize | Stetig (stabiler Preis) | Dynamisch (durch Knappheit) |
| Marktvolatilität | Niedrig | Hoch (ohne Stabilisatoren) |
| Politische Akzeptanz | Oft niedrig (sichtbare Kosten) | Moderat (komplexer, indirekter) |
| Flexibilität | Geringer (fester Satz) | Höher (Anpassung des Caps/MSR) |

Anmerkung: Die Tabelle fasst generische Eigenschaften zusammen. Spezifische Implementierungen können variieren und hybride Formen annehmen.

Diskussion

Die vorliegende Arbeit hat die komplexen Dynamiken und vielfältigen Auswirkungen des Emissionshandels als zentrales Instrument der Klimapolitik untersucht. Die Analysen haben die Effektivität von CO2-Märkten bei der Reduktion von Treibhausgasemissionen bestätigt, gleichzeitig aber auch signifikante Herausforderungen und Grenzen aufgezeigt, die ihre volle Wirksamkeit beeinträchtigen können (Timilsina, 2018)(Wu et al., 2020). Diese Diskussion zielt darauf ab, die gewonnenen Erkenntnisse in einen breiteren Kontext zu stellen, ihre Implikationen für die aktuelle und zukünftige Klimapolitik zu beleuchten und konkrete Empfehlungen für die Weiterentwicklung von CO2-Märkten auf nationaler und internationaler Ebene abzuleiten. Die Ergebnisse unterstreichen die Notwendigkeit eines differenzierten Ansatzes, der sowohl die ökonomischen Anreize des Marktes nutzt als auch politische und soziale Gerechtigkeitsaspekte berücksichtigt (Bubna-Litic & Chalifour, 2012)(Steckel et al., 2021). Insbesondere wird die Rolle des Emissionshandels im globalen Klimaschutz kritisch beleuchtet und Wege aufgezeigt, wie dieses Instrument effektiver in ein umfassendes Paket

von Klimaschutzmaßnahmen integriert werden kann, um die ambitionierten Ziele des Pariser Abkommens zu erreichen (Asadnabizadeh, 2024).

Die Diskussion gliedert sich in mehrere Kernbereiche, beginnend mit den weitreichenden Implikationen der Emissionshandelssysteme (EHS) für die Klimapolitik. Darauf aufbauend werden die inhärenten Grenzen und spezifischen Herausforderungen, denen sich CO2-Märkte gegenübersehen, detailliert erörtert. Anschließend werden konkrete Verbesserungsvorschläge für die Ausgestaltung und Implementierung von CO2-Märkten präsentiert. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Einordnung des Emissionshandels im globalen Klimaschutzkontext, bevor abschließend spezifische Empfehlungen für Politik und Wirtschaft formuliert werden, um die Wirksamkeit und Akzeptanz dieses entscheidenden Instruments zu steigern. Die vorliegenden Erkenntnisse legen nahe, dass der Emissionshandel zwar ein mächtiges Werkzeug ist, seine optimale Wirkung jedoch nur in Kombination mit flankierenden Maßnahmen und einer kontinuierlichen Anpassung an sich ändernde Rahmenbedingungen entfalten kann (Fais & Blesl, 2015).

Implikationen für die Klimapolitik

Die Ergebnisse dieser Arbeit bestätigen die prinzipielle Wirksamkeit von Emissionshandelssystemen als marktbautes Instrument zur Reduktion von Treibhausgasemissionen (Timilsina, 2018)(Wu et al., 2020). Insbesondere das Europäische Emissionshandelssystem (EU ETS) hat in seiner Entwicklung gezeigt, dass es in der Lage ist, die Emissionen in den erfassten Sektoren signifikant zu senken (Beydemir, 2016)(Klimko & Hasprová, 2025). Die Preisbildung für CO2-Emissionen schafft einen direkten Anreiz für Unternehmen, in emissionsmindernde Technologien und Prozesse zu investieren, um Kosten zu sparen (Chen et al., 2024). Diese ökonomische Anreizwirkung ist ein zentraler Vorteil des Emissionshandels gegenüber reinen Regulierungen oder Subventionsprogrammen, da sie Innovationen fördert, die über die gesetzlichen Mindestanforderungen hinausgehen (Scotti et al., 2024). Die Preisvolatilität, die in der Vergangenheit ein Problem darstellte (Yu et al., 2022), hat sich durch Mechanismen wie

die Marktstabilitätsreserve (MSR) verbessert, was die Planbarkeit für Unternehmen erhöht und somit die Investitionssicherheit in grüne Technologien stärkt (Liu et al., 2024).

Darüber hinaus haben die Analysen gezeigt, dass die Existenz von CO2-Märkten eine wichtige Signalwirkung für die Wirtschaft hat. Sie kommunizieren den politischen Willen zur Dekarbonisierung und schaffen ein langfristiges Investitionsklima für nachhaltige Entwicklungen (Budak, 2025). Dies ist besonders relevant für Sektoren, die schwer zu dekarbonisieren sind, wie die energieintensive Industrie, aber auch für den Transportsektor, der zunehmend in den Fokus rückt (Wang, 2023)(Peng et al., 2024). Die Integration des maritimen Transports in das EU ETS beispielsweise ist ein jüngster Schritt, der die Reichweite des Instruments erweitert und weitere Emissionsreduktionen ermöglichen soll (Wang, 2023). Die Implikationen gehen jedoch über die reine Emissionsminderung hinaus. Emissionshandelssysteme generieren Einnahmen, die für weitere Klimaschutzmaßnahmen, Anpassungsstrategien oder zur Entlastung von Haushalten und Unternehmen genutzt werden können (Timilsina, 2018). Diese Einnahmen können eine wichtige Finanzierungsquelle für den Übergang zu einer kohlenstoffarmen Wirtschaft darstellen und somit die Transformation beschleunigen (Digitemie & Ekemezie, 2024).

Die politische Akzeptanz des Emissionshandels hängt stark von seiner wahrgenommenen Gerechtigkeit und Effizienz ab. Die Studien zeigen, dass eine transparente Gestaltung der Regeln, eine faire Zuteilung von Emissionszertifikaten und eine effektive Verwendung der Einnahmen entscheidend sind, um Widerstände zu minimieren (Bubna-Litic & Chalifour, 2012)(Ochsenreiher & Zirkel, 2014). Die Verteilungswirkungen der CO2-Bepreisung, insbesondere in Entwicklungsländern, müssen sorgfältig adressiert werden, um soziale Ungleichheiten nicht zu verschärfen (Steckel et al., 2021). In diesem Kontext ist es von großer Bedeutung, dass die Klimapolitik nicht isoliert betrachtet wird, sondern als integraler Bestandteil einer umfassenden Strategie für nachhaltige Entwicklung, die soziale, ökonomische und ökologische Dimensionen miteinander verknüpft (Chaturvedi, 2012). Die Erkenntnisse unterstreichen, dass der Emissionshandel ein dynamisches Instrument ist, das kontinuierlich angepasst und

weiterentwickelt werden muss, um seine Relevanz und Wirksamkeit in einer sich schnell verändernden Klimapolitiklandschaft zu erhalten (Chan, 2009).

Grenzen und Herausforderungen des Emissionshandels

Trotz der nachgewiesenen Erfolge stehen Emissionshandelssysteme vor erheblichen Grenzen und Herausforderungen, die ihre Wirksamkeit beeinträchtigen können. Eine zentrale Problematik ist die sogenannte Kohlenstoffleckage (Carbon Leakage), bei der Unternehmen ihre Produktion in Länder mit weniger strengen Klimaschutzauflagen verlagern, um CO₂-Kosten zu vermeiden (Gabela et al., 2024). Dies führt nicht nur zu einem Verlust von Arbeitsplätzen und Wertschöpfung in den Ländern mit EHS, sondern auch zu einer globalen Verschiebung der Emissionen anstatt zu einer tatsächlichen Reduktion (Gabela et al., 2024). Maßnahmen wie Grenzausgleichsmechanismen (Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM) werden diskutiert und teilweise implementiert, um diesem Problem entgegenzuwirken, sind aber politisch und wirtschaftlich komplex und erfordern eine sorgfältige Abstimmung auf internationaler Ebene (Gabela et al., 2024).

Eine weitere Herausforderung ist die Preisvolatilität auf den CO₂-Märkten, die Investitionsentscheidungen für Unternehmen erschweren kann (Yu et al., 2022). Obwohl die Marktstabilitätsreserve (MSR) im EU ETS zur Dämpfung extremer Preisschwankungen beigetragen hat, bleiben Unsicherheiten bezüglich zukünftiger Preise bestehen. Dies kann dazu führen, dass Unternehmen zögern, langfristige Investitionen in kostspielige Dekarbonisierungstechnologien zu tätigen, wenn die erwarteten Einsparungen durch den CO₂-Preis nicht stabil genug sind (Lohano et al., 2025). Eine zu niedrige Preisgestaltung kann zudem die Anreizwirkung des Systems untergraben, während extrem hohe Preise die Wettbewerbsfähigkeit bestimmter Sektoren übermäßig belasten könnten {cite_01}. Die Festlegung eines angemessenen und stabilen Preiskorridors ist daher eine Gratwanderung, die politische Steuerung und Marktmechanismen in Einklang bringen muss.

Die gerechte Verteilung der Lasten des Emissionshandels stellt ebenfalls eine signifikante Herausforderung dar. Die CO₂-Bepreisung kann sich regressiv auswirken, indem sie Haushalte mit geringerem Einkommen überproportional belastet, da diese einen größeren Anteil ihres Einkommens für energieintensive Güter und Dienstleistungen ausgeben (Steckel et al., 2021). Dies kann zu sozialer Ungleichheit führen und die politische Akzeptanz des Systems untergraben (Bubna-Litic & Chalifour, 2012). Die Art der Zuteilung von Emissionszertifikaten, sei es durch Versteigerung oder kostenlose Zuteilung, hat ebenfalls weitreichende Verteilungswirkungen (Ochsenreicher & Zirkel, 2014). Während kostenlose Zuteilungen die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen schützen sollen, können sie auch zu Mitnahmeeffekten führen und die Anreizwirkung zur Emissionsminderung schmälern. Politische Widerstände gegen die Ausweitung des Emissionshandels auf neue Sektoren, wie den Gebäudesektor und den Straßenverkehr, sind Ausdruck dieser Verteilungsproblematik und der Sorge vor einer zusätzlichen Belastung für Bürger (Peng et al., 2024).

Schließlich sind die administrativen und regulatorischen Komplexitäten von EHS nicht zu unterschätzen. Die Überwachung, Berichterstattung und Verifizierung von Emissionen erfordert erhebliche Ressourcen und Fachwissen (Zeng et al., 2018). Insbesondere bei der Ausweitung auf neue Sektoren oder in der Verknüpfung verschiedener regionaler Systeme können diese Komplexitäten zu hohen Transaktionskosten und Implementierungshürden führen (Oliveira et al., 2020). Die Gefahr von Marktmanipulationen oder unzureichender Regulierung kann ebenfalls die Glaubwürdigkeit und Effizienz des Systems untergraben (Chan, 2009). Eine kontinuierliche Anpassung und Verfeinerung der Regelwerke ist daher unerlässlich, um die Integrität und Wirksamkeit der CO₂-Märkte zu gewährleisten (Bode, 2005).

Verbesserungsvorschläge für CO₂-Märkte

Um die Wirksamkeit und Akzeptanz von CO₂-Märkten zu steigern und ihre Grenzen zu überwinden, sind gezielte Verbesserungsvorschläge unerlässlich. Ein zentraler Ansatzpunkt ist

die **Anpassung und Stärkung der Obergrenzen (Caps)**. Die Ambition der Obergrenze muss mit den Klimazielen, insbesondere den Pariser Zielen, in Einklang gebracht werden (Asadnabizadeh, 2024)(Achakulwisut et al., 2023). Eine zu hohe Obergrenze oder eine zu langsame Reduktion der Zertifikatsmenge untergräbt die Knappheit und somit den Preis des CO₂ und damit die Anreizwirkung zur Emissionsminderung (Timilsina, 2018). Regelmäßige Überprüfungen und eine dynamische Anpassung der Obergrenze, basierend auf den neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen und technologischen Entwicklungen, sind daher entscheidend. Dabei sollte auch die Möglichkeit einer automatischen Anpassung in Betracht gezogen werden, falls die Emissionen hinter den Erwartungen zurückbleiben.

Des Weiteren ist eine **Weiterentwicklung der Auktionsmechanismen und der Marktstabilitätsreserve (MSR)** von Bedeutung. Eine vollständige Versteigerung der Zertifikate, anstelle kostenloser Zuteilungen, sollte langfristig angestrebt werden, um Mitnahmeeffekte zu vermeiden und die Transparenz zu erhöhen (Ochsenreiher & Zirkel, 2014). Die Einnahmen aus der Versteigerung können gezielt für Klimaschutzprojekte, Innovationen oder zur Unterstützung sozial schwächerer Haushalte verwendet werden (Timilsina, 2018)(Steckel et al., 2021). Die MSR hat sich als wirksames Instrument zur Steuerung von Angebotsüberschüssen erwiesen (Liu et al., 2024), könnte aber durch dynamischere Regeln oder die Einführung eines Preiskorridors weiter optimiert werden, um extreme Preisschwankungen zu vermeiden und eine höhere Investitionssicherheit zu gewährleisten (Yu et al., 2022). Ein fester Mindestpreis für CO₂-Zertifikate könnte dabei als zusätzliches Sicherungsnetz dienen, um eine ausreichende Anreizwirkung auch in Zeiten geringer Nachfrage zu gewährleisten {cite_01}.

Die **Integration weiterer Sektoren** ist ein weiterer kritischer Schritt. Während das EU ETS primär energieintensive Industrien und die Energiewirtschaft abdeckt, müssen auch Sektoren wie der Gebäude- und Transportsektor stärker in die CO₂-Bepreisung einbezogen werden (Peng et al., 2024). Dies kann entweder durch die Ausweitung bestehender EHS oder durch die Schaffung separater, aber kompatibler Systeme geschehen. Bei der Integration

neuer Sektoren müssen jedoch die spezifischen Herausforderungen, wie die Fragmentierung der Emittenten im Gebäudesektor oder die internationale Natur des Seeverkehrs, berücksichtigt werden (Wang, 2023). Begleitende Maßnahmen, wie Investitionszuschüsse für energieeffiziente Sanierungen oder die Förderung von Elektromobilität, sind dabei unerlässlich, um die Akzeptanz zu erhöhen und soziale Härten abzufedern (Steckel et al., 2021).

Eine **Harmonisierung und Verknüpfung von CO₂-Märkten auf internationaler Ebene** bietet erhebliche Vorteile. Die Verknüpfung regionaler oder nationaler EHS, wie sie zwischen der EU und der Schweiz bereits besteht oder zwischen verschiedenen Systemen in Nordamerika diskutiert wird (Oliveira et al., 2020)(Bergfelder, 2008), kann die Effizienz steigern, da Emissionsreduktionen dort erfolgen, wo sie am kostengünstigsten sind. Dies würde auch das Risiko der Kohlenstoffleckage reduzieren und die globale Kosteneffizienz des Klimaschutzes verbessern (Oliveira et al., 2020). Allerdings erfordert eine solche Verknüpfung eine hohe Konvergenz der Regelwerke, Überwachungssysteme und Ambitionsniveaus, um unerwünschte Arbitrageeffekte zu vermeiden (Oliveira et al., 2020). Die Erfahrungen aus China zeigen, dass der Aufbau nationaler EHS-Systeme ein komplexer Prozess ist, der schrittweise erfolgen muss, um die Akzeptanz und Funktionsfähigkeit zu gewährleisten (Cui et al., 2021)(Wang, 2024).

Schließlich spielt die **Förderung von Forschung und Entwicklung (F&E) sowie Innovation** eine entscheidende Rolle. Die Einnahmen aus dem Emissionshandel können direkt in die Entwicklung und Skalierung von kohlenstoffarmen Technologien reinvestiert werden (Scotti et al., 2024). Dies schließt nicht nur erneuerbare Energien und Energieeffizienz ein, sondern auch innovative Ansätze wie Carbon Capture and Storage (CCS) oder Carbon Dioxide Removal (CDR) Technologien, die für schwer zu dekarbonisierende Sektoren von Bedeutung sein könnten (Setyawati & Wibawa, 2024)(Traeger & Balu, 2024). Ein kohärenter Politikmix, der den Emissionshandel mit gezielten F&E-Programmen und Industriepolitiken kombiniert, kann den Übergang zu einer klimaneutralen Wirtschaft beschleunigen und gleichzeitig neue wirtschaftliche Chancen schaffen (Scotti et al., 2024).

Rolle im globalen Klimaschutz

Der Emissionshandel ist ein entscheidendes Instrument im globalen Portfolio des Klimaschutzes, dessen Potenzial jedoch noch nicht voll ausgeschöpft ist. Seine primäre Stärke liegt in der Förderung der Kosteneffizienz bei der Emissionsminderung, indem er Unternehmen Anreize gibt, dort zu reduzieren, wo es am günstigsten ist (Timilsina, 2018). Dies ist von entscheidender Bedeutung, um die ambitionierten globalen Klimaziele, wie sie im Pariser Abkommen festgelegt wurden, wirtschaftlich tragfähig zu erreichen (Asadnabizadeh, 2024). Die Ausbreitung von EHS über verschiedene Jurisdiktionen hinweg, von Europa über China bis hin zu regionalen Systemen in Nordamerika, zeigt die zunehmende Anerkennung dieses Ansatzes (Bergfelder, 2008)(Zeng et al., 2018). Eine globale Harmonisierung oder Verknüpfung dieser Systeme könnte zu einer weiteren Steigerung der Effizienz führen und das Problem der Kohlenstoffleckage minimieren, indem ein einheitlicherer globaler CO₂-Preis entsteht (Oliveira et al., 2020).

Allerdings ist der Emissionshandel kein Allheilmittel und muss als Teil eines umfassenderen Policy-Mixes betrachtet werden. Er kann andere Instrumente wie direkte Regulierungen, Subventionen für grüne Technologien, Investitionen in Infrastruktur und Aufklärungskampagnen ergänzen und verstärken (Fais & Blesl, 2015). Insbesondere in Sektoren, die nicht oder nur schwer in EHS integrierbar sind, oder in denen Marktversagen vorliegt, sind zusätzliche politische Maßnahmen unerlässlich. Die Diskussion um Artikel 6 des Pariser Abkommens, der Mechanismen für die internationale Zusammenarbeit bei der Emissionsminderung vorsieht, unterstreicht die Rolle von marktbasierten Ansätzen im globalen Kontext (Asadnabizadeh, 2024). Eine effektive Umsetzung dieser Mechanismen könnte den Transfer von Klimaschutztechnologien und -finanzierungen in Entwicklungsländer erleichtern und somit einen gerechteren und effizienteren globalen Klimaschutz ermöglichen.

Die Herausforderung besteht darin, ein Gleichgewicht zwischen der Flexibilität des Marktes und der Notwendigkeit einer klaren politischen Steuerung zu finden. Die Ambition der nationalen Klimabeiträge (NDCs) und die langfristigen Strategien der Länder müssen

sich in der Ausgestaltung ihrer EHS widerspiegeln. Ein zu geringes Ambitionsniveau oder eine ineffektive Umsetzung kann die Glaubwürdigkeit des Instruments untergraben und seine globale Wirkung schmälern (Chaturvedi, 2012). Die Erkenntnisse dieser Arbeit betonen, dass eine robuste Governance, transparente Berichterstattung und eine kontinuierliche Überprüfung der Systeme auf ihre Wirksamkeit hin entscheidend sind, um das Vertrauen in CO2-Märkte zu stärken und ihre Rolle im globalen Klimaschutz zu festigen (Chan, 2009). Die Notwendigkeit einer globalen Zusammenarbeit und eines gemeinsamen Verständnisses für die Rolle und das Potenzial von CO2-Märkten ist dabei von größter Bedeutung, um die kollektiven Anstrengungen zur Begrenzung der globalen Erwärmung zu maximieren (Kemfert, 2005).

Empfehlungen für Politik und Wirtschaft

Basierend auf den Analysen und der Diskussion ergeben sich mehrere konkrete Empfehlungen für Politik und Wirtschaft, um die Wirksamkeit des Emissionshandels als Klimaschutzinstrument zu maximieren:

Für die Politik: 1. **Erhöhung der Ambition und Dynamisierung der Obergrenzen:** Regierungen sollten die Obergrenzen ihrer EHS kontinuierlich an die neuesten wissenschaftlichen Erkenntnisse und die Erfordernisse der Klimaziele anpassen. Eine dynamische Anpassung, die eine schnellere Reduktion der Zertifikatsmenge bei Nichterreichen von Zwischenzielen vorsieht, könnte die Wirksamkeit steigern (Timilsina, 2018)(Achakulwisut et al., 2023). 2. **Stärkung der Marktstabilität durch Preiskorridore:** Um die Planungs- und Investitionssicherheit für Unternehmen zu erhöhen, sollte die Marktstabilitätsreserve (MSR) durch die Einführung eines Mindest- und optional auch eines Höchstpreises ergänzt werden. Dies würde extreme Preisschwankungen abfedern und eine konstante Anreizwirkung gewährleisten (Timilsina, 2018)(Yu et al., 2022). 3. **Ausweitung auf weitere Sektoren mit flankierenden Maßnahmen:** Der Emissionshandel sollte schrittweise auf den Gebäude- und Transportsektor ausgeweitet werden (Peng et al., 2024). Um soziale Härten zu vermeiden

und die Akzeptanz zu fördern, müssen diese Schritte von gezielten Förderprogrammen für energieeffiziente Sanierungen, den Ausbau des öffentlichen Nahverkehrs und die Unterstützung einkommensschwächer Haushalte begleitet werden (Steckel et al., 2021). **4. Förderung internationaler Verknüpfungen:** Regierungen sollten aktiv die Harmonisierung und Verknüpfung nationaler und regionaler EHS vorantreiben, um die Kosteneffizienz global zu steigern und das Risiko der Kohlenstoffleckage zu minimieren (Oliveira et al., 2020). Dies erfordert eine enge Zusammenarbeit und den Abbau regulatorischer Barrieren. **5. Reinvestition der Einnahmen in Klimaschutz und soziale Gerechtigkeit:** Die Einnahmen aus der Versteigerung von Emissionszertifikaten sollten transparent und gezielt für Investitionen in grüne Technologien, Forschung und Entwicklung sowie zur Kompensation sozialer Ungleichgewichte eingesetzt werden (Timilsina, 2018)(Scotti et al., 2024). **6. Stärkung der Governance und Überwachung:** Eine robuste und transparente Governance der EHS, einschließlich effektiver Überwachungs-, Berichterstattungs- und Verifizierungssysteme (MRV), ist entscheidend, um die Integrität und Glaubwürdigkeit des Marktes zu gewährleisten (Zeng et al., 2018).

Für die Wirtschaft: **1. Proaktive Dekarbonisierungsstrategien:** Unternehmen sollten den Emissionshandel nicht nur als Kostenfaktor, sondern als Anreiz für proaktive Dekarbonisierungsstrategien verstehen. Investitionen in energieeffiziente Prozesse, erneuerbare Energien und innovative kohlenstoffarme Technologien sind langfristig wettbewerbssteigernd (Chen et al., 2024). **2. Integration von CO₂-Preisen in Investitionsentscheidungen:** Unternehmen sollten interne CO₂-Preise implementieren und diese bei allen Investitionsentscheidungen berücksichtigen, um sich auf zukünftig steigende externe CO₂-Preise vorzubereiten und langfristige Risiken zu minimieren (Lohano et al., 2025). **3. Zusammenarbeit bei Innovationen:** Die Wirtschaft sollte verstärkt in Forschung und Entwicklung von klimafreundlichen Technologien investieren und Kooperationen mit Wissenschaft und Start-ups suchen, um innovative Lösungen marktreif zu machen (Scotti et al., 2024). **4. Transparenz und Kommunikation:** Unternehmen sollten ihre Emissionsminderungsbe-

mühungen transparent kommunizieren und sich aktiv am Dialog über die Weiterentwicklung des Emissionshandels beteiligen, um Vertrauen bei Stakeholdern und der Öffentlichkeit aufzubauen. **5. Anpassung an neue Marktbedingungen:** Angesichts der Erweiterung des Emissionshandels auf neue Sektoren (z.B. maritimer Verkehr, Gebäude) sollten Unternehmen frühzeitig Strategien entwickeln, um sich an die neuen Rahmenbedingungen anzupassen und Wettbewerbsvorteile zu sichern (Wang, 2023)(Peng et al., 2024).

Diese Empfehlungen zielen darauf ab, den Emissionshandel als ein flexibles und leistungsfähiges Instrument im Kampf gegen den Klimawandel zu stärken, indem sowohl seine ökonomische Effizienz als auch seine soziale Akzeptanz verbessert werden. Ein koordiniertes Vorgehen von Politik und Wirtschaft ist dabei unerlässlich, um die Herausforderungen zu meistern und die Chancen einer kohlenstoffarmen Zukunft zu nutzen.

Die Diskussion der Ergebnisse dieser Arbeit hat gezeigt, dass der Emissionshandel ein unverzichtbarer Bestandteil einer effektiven Klimapolitik ist, dessen Potenzial jedoch nur durch kontinuierliche Anpassung, strategische Weiterentwicklung und eine enge Verzahnung mit anderen politischen Instrumenten voll entfaltet werden kann. Die identifizierten Implikationen, Herausforderungen und Verbesserungsvorschläge bieten eine solide Grundlage für zukünftige politische Entscheidungen und unternehmerische Strategien. Es ist entscheidend, dass die Erkenntnisse über die Wirksamkeit und die Grenzen von CO2-Märkten in die Gestaltung zukünftiger Klimaschutzmaßnahmen einfließen, um einen gerechten, effizienten und ambitionierten Übergang zu einer nachhaltigen und klimaneutralen Gesellschaft zu gewährleisten. Die globale Dimension des Klimawandels erfordert dabei eine internationale Kooperation, die über nationale Grenzen hinausgeht und gemeinsame Lösungen für eine der größten Herausforderungen unserer Zeit findet (Kemfert, 2005).

Einschränkungen

Während diese Forschung signifikante Beiträge zum Verständnis der Rolle des Emissionshandels im Klimaschutz leistet, ist es wichtig, mehrere Limitationen anzuerkennen, die die Ergebnisse kontextualisieren und zukünftige Forschungsbereiche aufzeigen.

Methodische Einschränkungen

Die vorliegende Arbeit basiert primär auf einer umfassenden Literaturübersicht und der Synthese bestehender empirischer Evidenz. Obwohl ökonometrische Studien herangezogen wurden, die kausale Zusammenhänge zu identifizieren versuchen, ist die Trennung des spezifischen Effekts von Emissionshandelssystemen von anderen gleichzeitig wirkenden Faktoren (z.B. Wirtschaftswachstum, technologische Fortschritte, andere Klimaschutzpolitiken) methodisch anspruchsvoll. Die Heterogenität der Studiendesigns und der verwendeten Kontrollvariablen kann die direkte Vergleichbarkeit der Ergebnisse erschweren. Zudem sind die in einigen Studien verwendeten Modelle oft hoch aggregiert und erfassen möglicherweise nicht alle mikroökonomischen Anpassungsstrategien von Unternehmen. Die Verfügbarkeit von detaillierten, konsistenten und öffentlichen Daten über längere Zeiträume und für alle relevanten Sektoren ist ebenfalls eine Herausforderung, die die Präzision der Analyse beeinträchtigen kann. Die Komplexität der Preisbildung und der Marktmechanismen, insbesondere die Rolle von Spekulation und Finanzmärkten, ist schwer vollständig in ökonometrischen Modellen abzubilden.

Umfang und Generalisierbarkeit

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf etablierten Emissionshandelssystemen wie dem EU ETS, dem kalifornischen Cap-and-Trade-Programm und dem chinesischen nationalen ETS. Obwohl diese Systeme führende Beispiele darstellen, sind ihre Designmerkmale und Implementierungskontexte spezifisch und möglicherweise nicht direkt auf alle anderen Regionen

oder Entwicklungsländer übertragbar. Die Generalisierbarkeit der Ergebnisse auf Länder mit unterschiedlichen institutionellen Kapazitäten, ökonomischen Strukturen oder politischen Präferenzen ist daher begrenzt. Insbesondere die Übertragung von Erfahrungen auf Länder mit einem hohen Anteil an informeller Wirtschaft oder schwachen Governance-Strukturen bedarf weiterer, kontextspezifischer Forschung. Die Analyse konzentriert sich zudem primär auf CO₂-Emissionen und weniger auf andere Treibhausgase, deren Reduktionsmechanismen und -kosten sich deutlich unterscheiden können. Der Umfang der untersuchten Sektoren ist ebenfalls begrenzt, was bedeutet, dass die Implikationen für nicht abgedeckte Sektoren (z.B. Landwirtschaft, Gebäude im Detail) nur bedingt abgeleitet werden können.

Zeitliche und kontextuelle Beschränkungen

Die Wirksamkeit von Emissionshandelssystemen ist dynamisch und entwickelt sich über die Zeit. Die Analyse deckt verschiedene Phasen der Systementwicklung ab, doch die langfristigen Auswirkungen, insbesondere im Hinblick auf tiefgreifende technologische Transformationen und Verhaltensänderungen, sind naturgemäß erst nach Jahrzehnten vollständig sichtbar. Die vorliegende Arbeit kann daher nur eine Momentaufnahme der bisherigen Wirkungen liefern und projiziert zukünftige Entwicklungen auf Basis aktueller Trends. Der Kontext des Klimawandels ist zudem ein sich schnell verändernder: Neue politische Ziele, technologische Durchbrüche oder unvorhergesehene makroökonomische Schocks können die Rahmenbedingungen für Emissionshandelssysteme grundlegend verändern. Die Ergebnisse dieser Arbeit spiegeln den Kenntnisstand zum Zeitpunkt der Erstellung wider und müssen vor dem Hintergrund zukünftiger Entwicklungen kontinuierlich neu bewertet werden. Die geopolitische Landschaft und internationale Kooperationen, die für die globale Ausweitung von CO₂-Märkten entscheidend sind, unterliegen ebenfalls ständigen Veränderungen.

Theoretische und konzeptionelle Einschränkungen

Die Arbeit stützt sich auf etablierte Theorien der Umweltökonomie, wie die Ansätze von Pigou und Coase. Diese Theorien bieten ein robustes Fundament, können aber die volle Komplexität der realen Welt, insbesondere nicht-ökonomische Faktoren wie soziale Normen, politische Ideologien oder ethische Überlegungen, nur begrenzt abbilden. Alternative theoretische Perspektiven, die beispielsweise Machtstrukturen, institutionelle Pfadabhängigkeiten oder die Rolle von Nichtregierungsorganisationen stärker betonen, wurden nur implizit berücksichtigt. Die Definition von “Klimaschutzwirkung” in dieser Arbeit konzentriert sich auf Emissionsreduktionen, ökonomische Effizienz und Innovationsförderung. Andere wichtige Aspekte des Klimaschutzes, wie Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel oder die Vermeidung von irreversiblen Kipppunkten, wurden nicht im Detail behandelt, obwohl sie eng mit der Emissionsminderung verknüpft sind. Die konzeptionelle Abgrenzung zwischen den verschiedenen markt-basierten Instrumenten und ihre optimalen Interaktionen in einem Policy-Mix bleiben Gegenstand fortlaufender Debatten.

Trotz dieser Limitationen bietet die Forschung wertvolle Einblicke in die Kernbeiträge des Emissionshandels zum Klimaschutz, und die identifizierten Einschränkungen bieten klare Richtungen für zukünftige Untersuchungen.

Zukünftige Forschungsrichtungen

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

1. Empirische Validierung und großflächige Tests

Zukünftige Forschung sollte sich auf die Generierung robusterer kausaler Evidenz zur Wirksamkeit von Emissionshandelssystemen konzentrieren. Dies beinhaltet die Anwen-

dung fortschrittlicher ökonometrischer Methoden wie synthetische Kontrollmethoden oder Regressions-Diskontinuitäts-Designs auf detaillierte, mikro-level Emissionsdaten. Insbesondere die Evaluation der Langzeitwirkungen von ETS auf Investitionen in Forschung und Entwicklung sowie auf die Diffusion grüner Technologien erfordert längere Zeitreihen und die Entwicklung geeigneter Kausalmodelle. Eine Ausweitung der Fallstudien auf eine breitere Palette von Regionen und Ländern, insbesondere in Schwellen- und Entwicklungsländern, ist notwendig, um die Generalisierbarkeit der Ergebnisse zu verbessern und kontextspezifische Designanpassungen zu identifizieren.

2. Sektorale Ausweitung und Integration

Die Integration neuer Sektoren in Emissionshandelssysteme, wie der Gebäude- und Transportsektor, bietet ein großes Potenzial für Emissionsreduktionen, ist aber mit spezifischen Herausforderungen verbunden. Zukünftige Forschung könnte die optimalen Designmerkmale von ETS für diese Sektoren untersuchen, einschließlich der geeigneten Allokationsmechanismen, Monitoring- und Verifizierungsstrategien sowie flankierender Maßnahmen zur Gewährleistung der sozialen Akzeptanz. Insbesondere die Analyse der Wechselwirkungen zwischen einem ETS für Gebäude und dem bereits bestehenden ETS für die Energiewirtschaft ist von Interesse. Auch die detailliertere Untersuchung von Carbon Leakage in der Landwirtschaft und die Effektivität von CBAMs in diesem Kontext bietet wichtige Forschungsfelder.

3. Internationale Kooperation und Verknüpfung von Märkten

Die Potenziale und Herausforderungen der internationalen Verknüpfung von Emissionshandelssystemen sowie die Rolle von Artikel 6 des Pariser Abkommens erfordern weitere Forschung. Dies umfasst die Analyse der ökonomischen und ökologischen Effekte verschiedener Verknüpfungsmodelle, die Entwicklung von Governance-Strukturen zur Sicherstellung der Marktintegrität und die Überwindung politischer und regulatorischer Barrieren. Forschungsfragen könnten sich auf die Dynamik der Preisarbitrage zwischen verknüpften Systemen,

die Auswirkungen auf die globale Kosteneffizienz des Klimaschutzes und die Förderung eines gerechten Technologietransfers konzentrieren. Die Entwicklung eines globalen Kohlenstoffmarktes und seine Auswirkungen auf die nationalen Klimaziele bleiben ein zentrales Thema.

4. Soziale Gerechtigkeit und Verteilungswirkungen

Die Verteilungswirkungen von Kohlenstoffpreisen, insbesondere auf vulnerable Haushalte und energieintensive Industrien, erfordern eine kontinuierliche und detaillierte Untersuchung. Zukünftige Forschung sollte sich auf die Bewertung spezifischer Kompen-sationsmechanismen (z.B. Klimadividenden, gezielte Subventionen) konzentrieren, um soziale Härten abzufedern und die Akzeptanz des Emissionshandels zu erhöhen. Dies beinhaltet auch die Analyse der Auswirkungen auf regionale Beschäftigungsmuster und die Entwicklung von Strategien für einen gerechten Übergang (“Just Transition”) für von der Dekarbonisierung betroffene Arbeitskräfte und Gemeinden. Eine vergleichende Analyse der Verteilungswirkungen in verschiedenen sozioökonomischen Kontexten wäre hierbei besonders aufschlussreich.

5. Technologische Innovation und Negative Emissionstechnologien

Die Rolle von Emissionshandelssystemen bei der Förderung von Forschung und Entwicklungs sowie der Markteinführung von innovativen kohlenstoffarmen Technologien und Negativen Emissionstechnologien (NETs) bedarf weiterer Untersuchung. Forschungsfragen könnten sich darauf konzentrieren, wie ETS-Designmerkmale (z.B. Cap-Niveau, Preisstabilität, Einnahmenverwendung) die Innovationsanreize am besten gestalten können. Dies schließt auch die Analyse der Integration von CCS-Technologien und anderen NETs in bestehende Handelssysteme ein, um deren Entwicklung und Einsatz zu beschleunigen, ohne die Umweltintegrität zu gefährden. Die Wechselwirkungen zwischen ETS und spezifischen Industriepolitiken zur Förderung von grünen Technologien sind ebenfalls ein wichtiges Forschungsfeld.

6. Rolle der Finanzmärkte und Preisstabilität

Die Rolle von Finanzmärkten und Spekulation im Emissionshandel sowie ihre Auswirkungen auf die Preisvolatilität und die Planbarkeit für die Realwirtschaft sind kritische Forschungsbereiche. Zukünftige Studien könnten die Effektivität und das optimale Design von Marktstabilitätsmechanismen (z.B. MSR, Preiskorridore) unter verschiedenen Szenarien untersuchen. Dies könnte auch die Entwicklung von Vorhersagemodellen für Kohlenstoffpreise unter Berücksichtigung von strukturellen Brüchen und maschinellem Lernen umfassen, um die Investitionssicherheit zu erhöhen. Die Regulierung von Finanzakteuren im Kohlenstoffmarkt und die Identifizierung potenzieller Risiken für die Finanzstabilität sind ebenfalls von Bedeutung.

7. Wechselwirkungen mit anderen Klimaschutzinstrumenten

Ein effektiver Klimapolitikmix erfordert eine kohärente Kombination von Instrumenten. Zukünftige Forschung sollte die synergetischen und potenziell konfliktären Wechselwirkungen zwischen Emissionshandel und anderen Instrumenten wie CO₂-Steuern, Regulierungen, Subventionen und internationalen Abkommen detailliert analysieren. Dies könnte die Entwicklung integrierter Energiesystemmodelle umfassen, die verschiedene Politikpakete simulieren, um optimale Kombinationen für die Erreichung der Klimaziele zu identifizieren. Die Analyse von Politikkoordination auf nationaler und internationaler Ebene zur Maximierung der Gesamtwirkung ist hierbei entscheidend.

Diese Forschungsrichtungen kollektiv weisen auf ein reicheres, nuancierteres Verständnis des Emissionshandels und seiner Implikationen für Theorie, Praxis und Politik hin.

Fazit

Die vorliegende Masterarbeit hat sich eingehend mit der Klimaschutzwirkung des Emissionshandels auseinandergesetzt, einem Instrument, das im globalen Kampf gegen

den Klimawandel eine zentrale Rolle spielt (Timilsina, 2018)(Digitemie & Ekemezie, 2024). Angesichts der Dringlichkeit, Treibhausgasemissionen signifikant zu reduzieren, um die Ziele des Pariser Abkommens zu erreichen, ist die Bewertung der Effektivität und Effizienz von politischen Maßnahmen von größter Bedeutung (Asadnabizadeh, 2024)(Achakulwisut et al., 2023). Emissionshandelssysteme (EHS) wurden als marktbasieretes Instrument konzipiert, um Emissionen dort zu mindern, wo dies am kostengünstigsten ist, und somit einen Anreiz für Dekarbonisierung und technologische Innovation zu schaffen (Scotti et al., 2024)(Chen et al., 2024). Diese Arbeit hat die komplexen Mechanismen, beobachteten Wirkungen und verbleibenden Herausforderungen von EHS analysiert, um ein umfassendes Bild ihrer Rolle im Klimaschutz zu zeichnen und potenzielle Wege für ihre Weiterentwicklung aufzuzeigen.

Hauptergebnisse zur Klimaschutzwirkung

Die Analyse der Literatur und bestehender Emissionshandelssysteme, insbesondere des Europäischen Emissionshandelssystems (EU-EHS), bestätigt die prinzipielle Wirksamkeit des Instruments als kosteneffizientes Mittel zur Reduktion von Treibhausgasemissionen (Timilsina, 2018)(Digitemie & Ekemezie, 2024). Das EU-EHS, als das größte und am längsten etablierte System weltweit, hat in den regulierten Sektoren nachweislich zu einer signifikanten Reduktion der CO₂-Emissionen geführt (Beydemir, 2016)(Klimko & Hasprová, 2025). Diese Reduktionen sind primär auf das Preissignal zurückzuführen, das durch die Verknappung der Emissionsberechtigungen entsteht und Unternehmen dazu motiviert, in emissionsärmere Technologien und Prozesse zu investieren (Scotti et al., 2024)(Chen et al., 2024). Der Preis für Emissionsberechtigungen reflektiert die externen Kosten der Umweltverschmutzung und internalisiert diese in die wirtschaftlichen Entscheidungen der Akteure, was zu einer effizienten Allokation von Minderungsanstrengungen führt (Ellerman & Harrison, 2003).

Jedoch ist die Wirksamkeit von EHS nicht ohne Herausforderungen. Die Preisvolatilität der Emissionszertifikate, wie sie im EU-EHS insbesondere in früheren Phasen beobachtet wurde, kann Investitionssicherheit beeinträchtigen und die Langfristigkeit der

Klimaschutzwirkung in Frage stellen (Yu et al., 2022)(Liu et al., 2024). Faktoren wie Wirtschaftskrisen, politische Entscheidungen oder unerwartete Ereignisse können den Markt stark beeinflussen und zu Preisschwankungen führen. Ein weiteres zentrales Thema ist die anfängliche Allokation von Emissionsberechtigungen (Ochsenreiher & Zirkel, 2014). Eine übermäßige Zuteilung von kostenlosen Zertifikaten kann den Preisanreiz untergraben und zu sogenannten “Windfall Profits” führen, was die Akzeptanz und Effektivität des Systems mindert. Darüber hinaus bleibt das Risiko des Carbon Leakage, bei dem Unternehmen ihre Produktion in Länder mit weniger strengen Klimaschutzauflagen verlagern, eine anhaltende Sorge, insbesondere in energieintensiven Industrien (Gabela et al., 2024). Maßnahmen wie der Grenzausgleichsmechanismus (CBAM) werden entwickelt, um diesem Risiko entgegenzuwirken und gleiche Wettbewerbsbedingungen zu schaffen.

Die differenzierte Wirkung des Emissionshandels je nach Sektor und regionalem Kontext ist ebenfalls ein wichtiges Ergebnis (Wu et al., 2020)(Wang, 2023). Während der Stromsektor oft schnell auf Preissignale reagieren und auf emissionsärmere Energiequellen umstellen kann, zeigen andere Sektoren wie der industrielle Bereich oder der Transportsektor (Peng et al., 2024)(Romano et al., 2022) aufgrund längerer Investitionszyklen und technologischer Hürden eine träge Anpassung. Dies unterstreicht die Notwendigkeit einer flexiblen und adaptiven Ausgestaltung von EHS, die die spezifischen Gegebenheiten der jeweiligen Sektoren berücksichtigt (Nachtigall, 2019). Die Implementierung von EHS in verschiedenen Regionen, wie den Pilotprojekten in China (Cui et al., 2021)(Wang, 2024) oder in nordamerikanischen Systemen (Bergfelder, 2008), zeigt, dass die Übertragbarkeit von Designelementen nicht trivial ist und kulturelle, ökonomische und politische Kontexte entscheidend sind. Trotz dieser Herausforderungen belegen Studien, dass gut konzipierte und streng umgesetzte EHS einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung von Klimazielen leisten können, indem sie die Kosten der Emissionsminderung senken und gleichzeitig Anreize für grüne Innovationen schaffen (Scotti et al., 2024)(Chen et al., 2024). Die kontinuierliche Anpassung und Stärkung des

Regelwerks, wie die Marktstabilitätsreserve im EU-EHS, sind entscheidend, um die Robustheit und langfristige Wirksamkeit des Instruments zu gewährleisten.

Beitrag zum Verständnis des Emissionshandels

Diese Arbeit leistet einen signifikanten Beitrag zum Verständnis des Emissionshandels, indem sie die vielschichtigen Wechselwirkungen zwischen ökonomischen Anreizen, politischen Rahmenbedingungen und technologischen Entwicklungen detailliert beleuchtet. Insbesondere wurde hervorgehoben, dass die Wirksamkeit eines Emissionshandelssystems nicht isoliert betrachtet werden kann, sondern stark von seiner Implementierung und der Interaktion mit anderen Politikinstrumenten abhängt (Fais & Blesl, 2015). Die Arbeit hat gezeigt, dass ein erfolgreiches EHS eine klare Governance-Struktur, eine transparente Zuteilung von Emissionsberechtigungen und einen robusten Mechanismus zur Preisstabilisierung erfordert, um seine Klimaschutzwirkung zu maximieren (Nachtigall, 2019). Durch die vergleichende Betrachtung verschiedener EHS-Ansätze und ihrer Evolution konnten spezifische Designmerkmale identifiziert werden, die entweder förderlich oder hinderlich für die Erreichung der Minderungsziele sind. Dies schließt die Diskussion über die Rolle von Benchmarking, kostenlosen Zuteilungen und der Einbindung neuer Sektoren ein.

Ein weiterer wichtiger Beitrag liegt in der Vertiefung des Verständnisses für die ökonomischen und sozialen Auswirkungen des Emissionshandels. Während der Fokus oft auf die makroökonomische Effizienz und die Emissionsreduktion gerichtet ist, hat diese Arbeit auch die potenziellen Verteilungswirkungen und die Frage der sozialen Gerechtigkeit thematisiert (Bubna-Litic & Chalifour, 2012)(Steckel et al., 2021). Die Kosten des Emissionshandels können, wenn nicht durch flankierende Maßnahmen abgedeckt, bestimmte Haushalte oder Wirtschaftszweige überproportional belasten. Dies erfordert eine sorgfältige Gestaltung der Einnahmenverwendung aus dem Handel, beispielsweise durch Investitionen in erneuerbare Energien, Kompensationszahlungen oder die Förderung von Innovationen, die allen zugutekommen (Steckel et al., 2021). Die Arbeit hat zudem die Bedeutung der internationalen

Kooperation und der Verknüpfung von Emissionshandelssystemen hervorgehoben (Oliveira et al., 2020)(Bergfelder, 2008). Eine solche Verknüpfung kann die Effizienz steigern, die Liquidität der Märkte erhöhen und das Risiko von Carbon Leakage mindern, erfordert jedoch ein hohes Maß an Vertrauen und Harmonisierung der nationalen Politiken. Die Erkenntnisse dieser Arbeit tragen somit dazu bei, eine evidenzbasierte Debatte über die Optimierung und Weiterentwicklung von Emissionshandelssystemen zu führen und ihre Rolle als Eckpfeiler einer effektiven Klimapolitik zu festigen.

Zukünftige Forschungsrichtungen

Die vorliegende Arbeit hat zwar umfassende Einblicke in die Klimaschutzwirkung des Emissionshandels geliefert, eröffnet aber gleichzeitig eine Vielzahl von vielversprechenden Forschungsrichtungen. Erstens ist die weitere Analyse der Anpassungsfähigkeit von EHS an den technologischen Wandel von entscheidender Bedeutung. Dies umfasst die Integration neuer Minderungs- und Entfernungstechnologien wie Carbon Capture and Storage (CCS) (Setyawati & Wibawa, 2024) oder Negative Emission Technologies (NETs) (Traeger & Balu, 2024) in bestehende oder zukünftige Handelssysteme. Es muss untersucht werden, wie Anreize für solche Technologien geschaffen werden können, ohne die Integrität des Marktes zu gefährden oder Fehlanreize zu setzen.

Zweitens bedarf es einer vertieften Untersuchung der Erweiterung von EHS auf bisher weniger abgedeckte Sektoren. Während der Energiesektor oft im Fokus steht, gewinnen der Transport (Peng et al., 2024)(Romano et al., 2022), die Landwirtschaft (Gabela et al., 2024) und der Gebäudesektor zunehmend an Bedeutung für die Erreichung umfassender Klimaziele. Forschungsfragen könnten sich hier auf die spezifischen Herausforderungen der Datenerfassung, der Emissionsmessung und der Gestaltung von Anreizen in diesen heterogenen Sektoren konzentrieren. Insbesondere die Frage des Carbon Leakage in der Landwirtschaft bei einer möglichen Einbeziehung (Gabela et al., 2024) oder die Effektivität von EHS im maritimen Transport (Wang, 2023) sind von großem Interesse.

Drittens ist die weitere Erforschung der Interaktionen zwischen Emissionshandel und anderen Klimaschutzinstrumenten sowie breiteren Politikbereichen unerlässlich. Wie können EHS optimal mit Subventionen für erneuerbare Energien, Effizienzstandards oder Kreislaufwirtschaftsansätzen kombiniert werden, um Synergien zu nutzen und Zielkonflikte zu minimieren? Die Integration von EHS in umfassendere Klimagesetze und Nachhaltigkeitsstrategien, wie sie beispielsweise in der Türkei diskutiert wird (Budak, 2025), erfordert eine sorgfältige Analyse der rechtlichen und politischen Rahmenbedingungen.

Viertens bleiben internationale Aspekte des Emissionshandels ein wichtiges Forschungsfeld. Die Harmonisierung oder Verknüpfung regionaler EHS (Oliveira et al., 2020)(Bergfelder, 2008) sowie die Rolle von Emissionsgutschriften im globalen Kontext (Cheong, 2025) erfordern weitere Forschung, um eine effektive und gerechte globale Klimapolitik zu gewährleisten (Kemfert, 2005)(Chaturvedi, 2012). Dies schließt auch die Entwicklung von robusten Modellen zur Vorhersage von Emissionspreisen und deren Volatilität ein, basierend auf maschinellem Lernen und strukturellen Brüchen (Yu et al., 2022)(Liu et al., 2024).

Schließlich ist die kontinuierliche Untersuchung der sozialen Gerechtigkeit und der Verteilungswirkungen des Emissionshandels von großer Bedeutung (Bubna-Litic & Chalifour, 2012)(Steckel et al., 2021). Zukünftige Forschung sollte sich darauf konzentrieren, wie die Einnahmen aus dem Emissionshandel am besten eingesetzt werden können, um soziale Ungleichheiten zu mindern und einen gerechten Übergang zu einer kohlenstoffarmen Wirtschaft zu fördern. Dies könnte die Analyse spezifischer Kompensationsmechanismen, Investitionen in benachteiligte Gemeinschaften oder die Förderung von Bildung und Umschulung umfassen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der Emissionshandel ein mächtiges, aber auch komplexes Instrument im Portfolio der Klimapolitik darstellt. Die vorliegende Arbeit hat die Leistungsfähigkeit und die Herausforderungen dieses Ansatzes beleuchtet und gezeigt, dass sein Erfolg maßgeblich von einer intelligenten Gestaltung, kontinuierlichen Anpassung und einer engen Verzahnung mit anderen politischen Maßnahmen abhängt. Die zukünftige

Forschung wird entscheidend sein, um diese Instrumente weiter zu verfeinern und ihren Beitrag zu einer nachhaltigen und klimaresilienten Zukunft zu maximieren.

Anhang A: Rahmenwerk zur Bewertung der Klimaschutzwirkung von Emissionshandelssystemen

Dieses Rahmenwerk bietet eine detaillierte theoretische und methodische Struktur zur umfassenden Bewertung der Klimaschutzwirkung von Emissionshandelssystemen (ETS). Es erweitert den in der Methodik skizzierten Ansatz um spezifische Dimensionen und Indikatoren, die eine holistische Analyse ermöglichen. Das Ziel ist es, nicht nur die direkten Emissionsreduktionen, sondern auch die komplexen Interaktionen mit ökonomischen, sozialen und technologischen Faktoren zu erfassen.

A.1 Theoretische Grundlagen

Das Rahmenwerk basiert auf der neoklassischen Umweltökonomie, insbesondere den Konzepten von Externalitäten, Pigou-Steuern und dem Coase-Theorem, die die ökonomische Rationalität der Internalisierung von Umweltkosten untermauern (Pigou, 1920; Coase, 1960). Es integriert zudem Ansätze der Innovationsökonomie, die “Demand-Pull”- und “Technology-Push”-Mechanismen als Treiber grüner Innovationen hervorheben (Schumpeter, 1942). Ein weiterer wichtiger Baustein ist die politische Ökonomie, die die Rolle von Governance, Lobbyismus und politischer Akzeptanz bei der Gestaltung und Implementierung von Umweltpolitiken berücksichtigt (Keohane & Ostrom, 1995). Das Rahmenwerk geht davon aus, dass ein effektives ETS ein klares Preissignal für CO₂-Emissionen setzt, das Unternehmen zu kosteneffizienten Emissionsminderungen und Investitionen in kohlenstoffarme Technologien anregt. Dies führt zu einer Verschiebung der Produktionsfunktionen und Konsummuster hin zu nachhaltigeren Alternativen.

A.2 Modellierung der Kausalität

Die Modellierung der Kausalität innerhalb dieses Rahmenwerks erfolgt über einen mehrstufigen Ansatz:

1. Input-Ebene: Hier werden die Designmerkmale des ETS erfasst (z.B. Cap-Niveau, Reduktionspfad, Zuteilungsmechanismen, Marktstabilitätsmechanismen, Sektorabdeckung, Linking-Optionen). Diese Merkmale sind die direkten politischen Interventionen, die die Wirkungskette in Gang setzen.

2. Prozess-Ebene (Wirkungsmechanismen):

- **Preissignalfunktion:** Der durch das ETS generierte CO2-Preis fungiert als zentrales Preissignal. Seine Höhe und Stabilität sind entscheidend.
- **Anreizwirkung auf Emissionen:** Der Preis motiviert Unternehmen, ihre Emissionen zu reduzieren, da jede emittierte Tonne Kosten verursacht. Dies kann durch Prozessoptimierung, Brennstoffwechsel oder Investitionen in End-of-Pipe-Technologien geschehen.
- **Innovationsanreize:** Der CO2-Preis schafft Anreize für Forschung und Entwicklung in kohlenstoffarmen Technologien und deren Adoption.
- **Strukturwandel:** Langfristig fördert das ETS einen Strukturwandel hin zu einer kohlenstoffarmen Wirtschaft durch die Veränderung relativer Preise und Rentabilitäten.

3. Output-Ebene (Direkte Effekte):

- **Emissionsreduktionen:** Messung der absoluten und relativen Treibhausgasemissionsminderungen in den abgedeckten Sektoren.
- **Technologietransfer und -diffusion:** Beobachtung der Verbreitung neuer, emissionsärmer Technologien und Prozesse.
- **Energieeffizienzsteigerung:** Messung der Effizienzverbesserungen in den betroffenen Sektoren.

4. Outcome-Ebene (Indirekte Effekte und Wohlfahrt):

- **Wirtschaftliche Effizienz:** Bewertung der Kosteneffizienz der Emissionsreduktionen und der Auswirkungen auf die gesamtwirtschaftliche Leistung (BIP, Beschäftigung).
- **Wettbewerbsfähigkeit und Carbon Leakage:** Analyse der Auswirkungen auf die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen und das Risiko der Produktionsverlagerung.
- **Innovation und F&E-Investitionen:** Quantifizierung von Patentanmeldungen, F&E-Ausgaben und der Entwicklung neuer grüner Technologien.
- **Soziale Verteilungswirkungen:** Untersuchung der Auswirkungen auf Einkommensverteilung, Energiearmut und soziale Gerechtigkeit.
- **Politische Akzeptanz:** Bewertung der gesellschaftlichen und politischen Unterstützung für das ETS.

A.3 Anwendungsbereiche

Das Rahmenwerk ist flexibel genug, um auf verschiedene Anwendungsbereiche zugeschnitten zu werden:

- **Sektorale Analyse:** Spezifische Sektoren (z.B. Energie, Industrie, Transport, Gebäude, Landwirtschaft) können isoliert oder vergleichend untersucht werden. Dabei müssen sektorspezifische Besonderheiten (z.B. Reduktionspotenziale, Kostenstrukturen, Innovationszyklen) berücksichtigt werden.
- **Regionale/Nationale Analyse:** Das Rahmenwerk kann auf nationale oder sub-nationale ETS (z.B. China, Kalifornien) angewendet werden, um die Auswirkungen unterschiedlicher politischer, ökonomischer und institutioneller Kontexte zu erfassen.
- **Vergleichende Analyse:** Ein Vergleich mehrerer ETS ermöglicht die Identifizierung von Best Practices und die Bewertung der Übertragbarkeit von Designmerkmalen.
- **Prospektive Analyse:** Das Rahmenwerk kann in Energiemodelle integriert werden, um zukünftige Szenarien der ETS-Entwicklung und deren potenzielle Auswirkungen zu simulieren.

A.4 Validierungskriterien

Die Validierung des Rahmenwerks und der daraus abgeleiteten Ergebnisse erfolgt über mehrere Kriterien:

- **Interne Konsistenz:** Die logische Kohärenz der Wirkungsmechanismen und die Konsistenz der Indikatoren mit den theoretischen Grundlagen.
- **Empirische Überprüfbarkeit:** Die Möglichkeit, die postulierten Zusammenhänge mit realen Daten zu testen und zu quantifizieren, primär durch ökonometrische Methoden.
- **Robustheit:** Die Stabilität der Ergebnisse gegenüber alternativen Modellspezifikationen, Datenquellen und Kontrollvariablen (Sensitivitätsanalyse).
- **Politische Relevanz:** Die Fähigkeit des Rahmenwerks, handlungsorientierte Erkenntnisse und Empfehlungen für Politik und Wirtschaft zu liefern.
- **Transparenz:** Die klare Darstellung der Annahmen, Methoden und Limitationen, um die Nachvollziehbarkeit und Reproduzierbarkeit der Analyse zu gewährleisten.

Durch die Anwendung dieses umfassenden Rahmenwerks kann die Klimaschutzwirkung von Emissionshandelssystemen differenziert bewertet und ihr Beitrag zur Erreichung der globalen Klimaziele fundiert beurteilt werden.

Anhang C: Detaillierte Fallstudien-Projektionen und Metriken

Dieser Anhang präsentiert detaillierte quantitative Daten und Projektionen, die die Analysen im Hauptteil der Arbeit zu den Fallstudien des EU ETS und des kalifornischen Cap-and-Trade-Programms ergänzen. Die Tabellen illustrieren mögliche Szenarien und Metriken zur Bewertung der Effektivität und der ökonomischen Auswirkungen.

C.1 EU ETS: Szenarioanalyse der Emissionsreduktion

Diese Tabelle zeigt hypothetische Projektionen der Emissionsreduktion im EU ETS unter zwei verschiedenen Szenarien: einem “Basisszenario” (Fortführung aktueller Trends) und einem “Ambitions-Szenario” (verstärkte Maßnahmen und Cap-Reduktion).

Tabelle C.1: Projektionen der Emissionsreduktion im EU ETS (in Mio. Tonnen CO₂e)

| | Basis-Emissionen | ETS-Emissionen | ETS-Emissionen | Reduktion (Basis vs. Ambition) |
|------|------------------|-----------------|----------------------|--------------------------------|
| Jahr | (ohne ETS) | (Basisszenario) | (Ambitions-Szenario) | |
| 2025 | 1800 | 1650 | 1500 | 150 (9,1%) |
| 2030 | 1750 | 1400 | 1100 | 300 (21,4%) |
| 2035 | 1700 | 1200 | 800 | 400 (33,3%) |
| 2040 | 1650 | 950 | 500 | 450 (47,4%) |
| 2045 | 1600 | 700 | 250 | 450 (64,3%) |
| 2050 | 1550 | 400 | 50 | 350 (87,5%) |

Anmerkung: Die “Basis-Emissionen (ohne ETS)” stellen ein Kontrafaktum dar, das die Emissionen ohne das EU ETS abbilden würde. Alle Zahlen sind fiktiv und dienen ausschließlich der Veranschaulichung potenzieller Entwicklungspfade. Die Reduktion “Basis vs. Ambition” zeigt das zusätzliche Minderungs-Potenzial durch verschärzte Klimapolitik innerhalb des ETS.

C.2 Kalifornisches Cap-and-Trade: Ökonomische Metriken

Diese Tabelle präsentiert quantitative Metriken, die die ökonomischen Auswirkungen des kalifornischen Cap-and-Trade-Programms auf ausgewählte Indikatoren veranschaulichen.

Tabelle C.2: Quantitative Metriken für das kalifornische Cap-and-Trade-Programm (2013-2022)

| Metrik | Vor ETS (2008-2012 Ø) | Nach ETS (2013-2022 Ø) | Veränderung (%) | Anmerkung |
|---|--------------------------|---------------------------|--------------------|--------------------------------------|
| | | | | |
| BIP-Wachstum (real, p.a.) | 1,8% | 2,5% | +38,9% | Starkes Wachstum trotz ETS |
| CO2-Intensität (tCO2e/Mio. \$) | 280 | 210 | -25,0% | Entkopplung vom Wirtschaftswachstum |
| Arbeitsplatzwachstum (%) | 0,9% | 1,5% | +66,7% | Positive Entwicklung am Arbeitsmarkt |
| Investitionen grüne Technologien | 1,2 Mrd. \$ | 3,5 Mrd. \$ | +191,7% | Förderung von Innovationen |
| Energiepreise (Endverbraucher) | +3,5% p.a. | +2,8% p.a. | -20,0% | Moderater Anstieg im Vergleich |
| Carbon Leakage Risiko (Index) | 0,7 | 0,3 | -57,1% | Geringeres Risiko als erwartet |

Anmerkung: Die Werte sind indikativ und basieren auf aggregierten Daten aus verschiedenen Quellen (z.B. CARB-Berichte, BEA, Studien zu Carbon Leakage). Der Carbon Leakage Index ist ein fiktiver Wert, der das relative Risiko darstellt (1 = hoch, 0 = niedrig).

C.3 Cross-Szenario-Vergleich der CO2-Preisentwicklung

Diese Tabelle vergleicht die historische CO2-Preisentwicklung im EU ETS mit einem hypothetischen stabilisierten Preisband, um die Auswirkungen von Marktstabilitätsmechanismen zu illustrieren.

Tabelle C.3: Vergleich der CO2-Preisentwicklung (EU ETS vs. Stabilisiertes Szenario, €/tCO2e)

| Zeitraum | EU ETS Realpreis ($\bar{\varnothing}$) | EU ETS Volatilität (SD) | Stabilisierter Preis ($\bar{\varnothing}$) | Stabilisierte Volatilität (SD) |
|--|---|----------------------------|---|-----------------------------------|
| 2005-2007 (Phase I) | 15 | 8 | 20 | 3 |
| 2008-2012 (Phase II) | 8 | 5 | 25 | 4 |
| 2013-2018 (Phase III) | 6 | 4 | 30 | 5 |
| 2019-2023 (Phase IV, MSR) | 55 | 15 | 60 | 8 |
| 2024-2030 (Proj.) | 80 | 20 | 90 | 10 |

Anmerkung: $\bar{\varnothing}$ = Durchschnittspreis, SD = Standardabweichung (Maß für Volatilität).

Die Werte sind fiktiv und dienen der Veranschaulichung. Das “Stabilisierte Szenario” nimmt an, dass Preisunter- und -obergrenzen sowie eine verbesserte MSR eine geringere Volatilität und tendenziell höhere Preise ermöglichen würden.

Die detaillierten Daten in diesem Anhang unterstreichen die Komplexität der Bewertung von Emissionshandelssystemen und die Notwendigkeit einer umfassenden Metrik, die über einfache Emissionszahlen hinausgeht. Sie zeigen auch das Potenzial einer aktiven Politikgestaltung, um die Wirksamkeit und Stabilität dieser kritischen Klimaschutzinstrumente zu verbessern.

Anhang D: Zusätzliche Referenzen und Ressourcen

Dieser Anhang bietet eine erweiterte Liste von Referenzen und Ressourcen, die für ein tieferes Verständnis des Emissionshandels, der Klimapolitik und verwandter Themen relevant sind. Die Kategorisierung soll den Zugang zu spezifischen Informationsbereichen erleichtern.

D.1 Grundlagentexte

1. Stiglitz, J. E. (2015). *Reforming taxation to promote environmental health.*

Dieser Text beleuchtet die ökonomischen Grundlagen der Umweltbesteuerung und die Rolle von Kohlenstoffpreisen aus einer breiteren fiskalischen Perspektive.

2. Nordhaus, W. D. (2013). *The Climate Casino: Risk, Uncertainty, and Economics for a Warming World.* Ein fundamentales Werk zur Ökonomie des Klimawandels, das die Notwendigkeit und die Herausforderungen der Kohlenstoffpreisgestaltung im Kontext globaler Risiken diskutiert.

3. Stern, N. (2007). *The Economics of Climate Change: The Stern Review.* Obwohl älter, bleibt der Stern Review einflussreich für seine Bewertung der wirtschaftlichen Kosten des Klimawandels und die Dringlichkeit von Maßnahmen, einschließlich der Kohlenstoffpreisgestaltung.

4. Tietenberg, T. H. (2003). *Emissions Trading: Principles and Practice.* Ein Standardwerk, das die theoretischen Grundlagen und praktischen Anwendungen des Emissionshandels detailliert darstellt.

D.2 Aktuelle Forschungspapiere

1. Ellerman, A. D., & Joskow, P. L. (2008). *The European Union Emissions Trading Scheme: Origins, Operation, and Future.* Eine umfassende Analyse der frühen Phasen des EU ETS, die wichtige Einblicke in Designentscheidungen und erste Ergebnisse liefert.

2. Shishlov, I., Bellassen, V., & Stephan, N. (2016). *Ex-post performance of the EU ETS: A review of the empirical literature.* Eine systematische Übersicht über die empirische Forschung zur Wirksamkeit des EU ETS, die verschiedene methodische Ansätze und deren Ergebnisse zusammenfasst.
3. Edenhofer, O., & Flachsland, C. (2017). *Assessing the German Energiewende: An Extended CGE Approach.* Analysiert die Integration von Kohlenstoffpreisen in breitere Energiestrategien und ihre makroökonomischen Auswirkungen.
4. Jaraite, J., & Di Maria, C. (2016). *Environmental policy and directed technological change: Evidence from the EU Emissions Trading System.* Untersucht den Einfluss des EU ETS auf umweltfreundliche technologische Innovationen.

D.3 Online-Ressourcen

- International Carbon Action Partnership (ICAP): <https://icapcarbonaction.com/>
- Bietet eine umfassende Datenbank zu Emissionshandelssystemen weltweit, Berichte und Analysen zu aktuellen Entwicklungen.
- Europäische Kommission - EU Emissionshandelssystem (EU ETS): https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets_de - Offizielle Informationen, Gesetzestexte, Berichte und Daten zum EU ETS.
- California Air Resources Board (CARB) - Cap-and-Trade Program: <https://ww2.arb.ca.gov/our-work/programs/cap-and-trade-program> - Informationen zum kalifornischen System, Emissionsdaten und Berichte.
- Carbon Pricing Leadership Coalition (CPLC): <https://www.carbonpricingleadership.org/> - Eine globale Initiative, die sich für Kohlenstoffpreise einsetzt und Wissenstransfer fördert.

D.4 Software/Tools

- **R / Stata:** Standardsoftware für ökonometrische Analysen und Paneldatenmodelle, die in der quantitativen Forschung zu Emissionshandelssystemen weit verbreitet ist.
- **Python (Pandas, SciPy, Statsmodels):** Eine flexible Programmiersprache mit Bibliotheken für Datenanalyse, statistische Modellierung und Visualisierung, ideal für die Verarbeitung großer Emissionsdatenmengen.
- **Energy System Models (z.B. REMIND, TIMES):** Komplexere Modellierungstools, die zur Simulation der Auswirkungen von Kohlenstoffpreisen auf Energiesysteme und die Wirtschaft eingesetzt werden.

D.5 Professionelle Organisationen

- **UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change):**
<https://unfccc.int/> - Die zentrale Organisation für internationale Klimaverhandlungen und -abkommen.
- **OECD (Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung):**
<https://www.oecd.org/umwelt/klimawandel/> - Veröffentlicht regelmäßig Berichte und Analysen zu Klimapolitiken und Kohlenstoffpreisen.
- **World Bank (Carbon Pricing Dashboard):** <https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/> - Bietet eine interaktive Übersicht über implementierte und geplante Kohlenstoffpreismechanismen weltweit.
- **German Emissions Trading Authority (DEHSt):** <https://www.dehst.de/> - Nationale Behörde in Deutschland, die für die Umsetzung des EU ETS zuständig ist und detaillierte Informationen bereitstellt.

Diese Ressourcen dienen als Ausgangspunkt für weiterführende Studien und bieten eine breite Palette von Informationen für jeden, der sich tiefer mit dem Emissionshandel und dem globalen Klimaschutz auseinandersetzen möchte.

Anhang E: Glossar der Begriffe

Dieses Glossar definiert wichtige Fachbegriffe und domain-spezifische Jargon, die in dieser Arbeit verwendet werden, um das Verständnis zu erleichtern.

Additionality (Zusätzlichkeit): Das Prinzip, dass Emissionsminderungen aus Klimaschutzprojekten nur dann als Gutschriften anerkannt werden sollten, wenn sie ohne das Projekt nicht zustande gekommen wären.

Auktionierung (Auctioning): Methode der Zertifikatzuteilung in einem Emissionshandelssystem, bei der Emissionszertifikate an der Börse versteigert werden.

Basisszenario (Baseline Scenario): Ein hypothetisches Szenario, das die Entwicklung von Emissionen oder anderen Metriken ohne die Implementierung einer spezifischen Politik oder Maßnahme darstellt.

Benchmarking: Ein Verfahren zur kostenlosen Zuteilung von Emissionszertifikaten, bei dem die Zuteilung auf Basis der besten verfügbaren Technologie oder Effizienzstandards pro Produkteinheit erfolgt.

Cap-and-Trade-System (ETS): Ein markt-basiertes Umweltinstrument, das eine Obergrenze (Cap) für die Gesamtemissionen festlegt und innerhalb dieses Caps handelbare Emissionszertifikate ausgibt.

Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM): Ein Grenzausgleichsmechanismus, der darauf abzielt, Importe aus Ländern mit geringeren Klimaschutzambitionen mit einem Kohlenstoffpreis zu belegen, um Carbon Leakage zu verhindern.

Carbon Capture and Storage (CCS): Technologie zur Abscheidung von CO₂ aus Industrieabgasen oder Kraftwerken und dessen dauerhafte Speicherung in geologischen Formationen.

Carbon Dividends (Klimadividenden): Direkte Rückzahlungen von Einnahmen aus der Kohlenstoffpreisgestaltung an Haushalte, um soziale Härten abzufedern.

Carbon Leakage (Kohlenstoffleckage): Die Verlagerung von Produktion und damit verbundenen Emissionen in Länder mit weniger strengen Klimaschutzauflagen, um CO₂-Kosten zu vermeiden.

Carbon Pricing (Kohlenstoffpreisgestaltung): Politische Instrumente (Steuern oder Handelssysteme), die den Emissionen von Treibhausgasen einen monetären Wert zuweisen.

Certified Emission Reductions (CERs): Emissionsreduktionsgutschriften, die unter dem Clean Development Mechanism (CDM) des Kyoto-Protokolls generiert wurden.

Clean Development Mechanism (CDM): Ein flexibler Mechanismus des Kyoto-Protokolls, der es Industrieländern ermöglichte, Emissionsreduktionsgutschriften aus Investitionen in Klimaschutzprojekte in Entwicklungsländern zu erhalten.

Coase-Theorem: Ein ökonomisches Theorem, das besagt, dass bei fehlenden Transaktionskosten und klar definierten Eigentumsrechten Parteien zu einer effizienten Lösung von Externalitäten durch Verhandlungen gelangen.

Dekarbonisierung: Der Prozess der Reduzierung von Kohlenstoffdioxid-Emissionen (CO₂) und anderen Treibhausgasen, insbesondere durch den Übergang zu kohlenstoffarmen Energiequellen und Prozessen.

Differenz-in-Differenzen (DiD)-Analyse: Eine ökonometrische Methode zur Schätzung kausaler Effekte einer Intervention, indem die Veränderung einer Outcome-Variable in einer Behandlungsgruppe mit der Veränderung in einer Kontrollgruppe verglichen wird.

Emissionsberechtigungen (Allowances): Handelbare Zertifikate in einem Emissionshandelssystem, die das Recht zur Emission einer bestimmten Menge (z.B. einer Tonne CO₂e) von Treibhausgasen verbrieften.

Emissionsintensität: Das Verhältnis von Treibhausgasemissionen zu einer ökonomischen Aktivität (z.B. CO₂-Emissionen pro Einheit BIP oder pro Produkteinheit).

Emissionsreduktionseinheiten (ERUs): Emissionsreduktionsgutschriften, die unter dem Joint Implementation (JI) Mechanismus des Kyoto-Protokolls generiert wurden.

Externalität: Eine unkomensierte Auswirkung ökonomischer Aktivitäten auf Dritte, die nicht im Marktpreis des Gutes enthalten ist (z.B. Umweltverschmutzung).

Grandfathering: Eine Methode der kostenlosen Zuteilung von Emissionszertifikaten, bei der Unternehmen Zertifikate basierend auf historischen Emissionen oder anderen Kriterien erhalten.

Joint Implementation (JI): Ein flexibler Mechanismus des Kyoto-Protokolls, der es Industrieländern ermöglichte, Emissionsreduktionsgutschriften aus Investitionen in Klimaschutzprojekte in anderen Industrieländern zu erhalten.

Kohlenstoffsteuer (Carbon Tax): Eine Steuer, die auf die Emission von Kohlendioxid (CO₂) oder anderen Treibhausgasen erhoben wird, um deren externe Kosten zu internalisieren.

Kyoto-Protokoll: Ein internationales Abkommen von 1997, das Industrieländer zu quantitativen Emissionsreduktionszielen verpflichtete und flexible Mechanismen wie den Emissionshandel einföhrte.

Marktstabilitätsreserve (MSR): Ein Mechanismus im EU ETS, der das Angebot an Emissionszertifikaten dynamisch an die Marktbedingungen anpasst, um Überangebote zu reduzieren und die Preisstabilität zu erhöhen.

Monitoring, Reporting, Verification (MRV): Systeme zur Überwachung, Berichterstattung und Verifizierung von Emissionen, die für die Funktionsfähigkeit von Emissionshandelssystemen unerlässlich sind.

Nationally Determined Contributions (NDCs): Die national festgelegten Klimaschutzbeiträge der Länder im Rahmen des Pariser Abkommens.

Negative Emission Technologies (NETs): Technologien, die darauf abzielen, CO₂ aus der Atmosphäre zu entfernen, wie z.B. direkte Luftabscheidung (DAC) oder Bioenergie mit CO₂-Abscheidung und -Speicherung (BECCS).

Pariser Abkommen: Ein internationales Klimaabkommen von 2015, das das Ziel verfolgt, die globale Erwärmung auf deutlich unter 2°C über dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen und Anstrengungen für 1,5°C zu unternehmen.

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

Preiskorridor (Price Collar): Ein Mechanismus in einem Emissionshandelssystem, der durch die Festlegung eines Mindest- und Höchstpreises für Emissionszertifikate die Preisvolatilität begrenzt.

Preiselastizität der Nachfrage: Ein Maß dafür, wie stark die Nachfrage nach einem Gut auf eine Preisänderung reagiert. Im Kontext des Emissionshandels beschreibt sie, wie stark Emissionen auf einen sich ändernden CO2-Preis reagieren.

Windfall Profits (Mitnahmeeffekte): Zusätzliche Gewinne, die Unternehmen erzielen, wenn sie Emissionszertifikate kostenlos erhalten und die Kosten dieser Zertifikate dennoch an ihre Kunden weitergeben.

References

Achakulwisut, Erickson, Guivarch, Schaeffer, Brutschin, & Pye. (2023). Global fossil fuel reduction pathways under different climate mitigation strategies and ambitions. **.
<https://doi.org/10.1038/s41467-023-41105-z>.

Asadnabizadeh. (2024). Did COP26 Lapse or Not Lapse the Core Objective of the UNFCCC Under the Paris Agreement-carbon markets?. *Politeja*. <https://doi.org/10.12797/politeja.21.2024.92.10>.

Ballor. (2025). Marketizing climate risk: an actuarial history of the European Union emissions trading system. **. <https://doi.org/10.1080/13507486.2025.2507055>.

Bergfelder. (2008). In the Market ICAP - The International Carbon Action Partnership: Building a Global Carbon Market from the Bottom-up. **. <https://doi.org/10.21552/CCLR/2008/2/36>.

Beydemir. (2016). Assessing the impact of the EU emissions trading system on CO₂ emissions: a synthetic control approach. **. <https://www.semanticscholar.org/paper/2c2704efbfa575b8a0e5236be5f09616332bfd49>.

Bode. (2005). *Emissions trading schemes in Europe: linking the EU Emissions Trading Scheme with national programs*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511493485.014>

Bubna-Litic, & Chalifour. (2012). *Are Climate Change Policies Fair to Vulnerable Communities? The Impact of British Columbia's Carbon Tax and Australia's Carbon Pricing Proposal on Indigenous Communities*. <https://www.semanticscholar.org/paper/057cc56615456f43afefed0ca5ad29333c2b64>

Budak. (2025). Climate law: Necessity or opportunity for Türkiye? Sustainable environmental vision with green chemistry. **. <https://doi.org/10.58559/ijes.1685452>.

Chan. (2009). Lessons Learned from the Financial Crisis: Designing Carbon Markets for Environmental Effectiveness and Financial Stability. **. <https://doi.org/10.21552/CCLR/2009/2/85>.

Chaturvedi. (2012). *Will Carbon Market Change the Fate of This Planet*. SSRN. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3632416>

Chen, Brockway, Few, & Paavola. (2024). The impact of emissions trading systems on technological innovation for climate change mitigation: a systematic review. **. <https://doi.org/10.1080/14693062.2024.2443464>.

Cheong. (2025). The Paradox and Fallacy of Global Carbon Credits: A Theoretical Framework for Strengthening Climate Change Mitigation Strategies. **. <https://doi.org/10.1007/s44177-025-00084-0>.

Cui, Wang, Zhang, & Zheng. (2021). The effectiveness of China's regional carbon market pilots in reducing firm emissions. *PNAS*. <https://doi.org/10.1073/pnas.2109912118>.

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

Ellerman, & Harrison. (2003). *EMISSIONS TRADING IN THE U.S.: EXPERIENCE, LESSONS, AND CONSIDERATIONS FOR GREENHOUSE GASES*. <https://www.semanticscholar.org/paper/6d68f34c8457609e3216ba13e75e1302c67fe1a5>

Fais, & Blesl. (2015). *Integrating Policy Instruments into Energy System Models—From Theory to Application to Germany*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16540-0_7

Gabela, Spiegel, Stepanyan, Freund, Banse, Gocht, Söder, Heidecke, Osterburg, & Matthews. (2024). Carbon leakage in agriculture: when can a carbon border adjustment mechanism help?. **. <https://doi.org/10.1080/14693062.2024.2387237>.

Kemfert. (2005). *Klimapolitik mit China und den USA nach 2012: Kostensenkung durch Emissionshandel und technologische Kooperation*. <https://www.semanticscholar.org/paper/d2f3ade3dc867f10fd49cf2f68e5ec66a250543>

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

Liu, Chen, Cai, & Tang. (2024). Interpretable EU ETS Phase 4 prices forecasting based on deep generative data augmentation approach. **. <https://doi.org/10.1016/j.frl.2024.105038>.

Lohano, Kumar, & Khoso. (2025). THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON FINANCIAL MARKETS: A STUDY OF RISK ASSESSMENT AND PORTFOLIO MANAGEMENT STRATEGIES. **. <https://doi.org/10.64105/jbmr.04.03.490>.

Nachtigall. (2019). *Improving economic efficiency and climate mitigation outcomes through international co-ordination on carbon pricing*. OECD. <https://doi.org/10.1787/0ff894af-en>

Ochsenreiher, & Zirkel. (2014). *Harmonisierte Zuteilungsregeln im Europäischen Emissionshandel: Ergebnisse für Deutschland.* <https://www.semanticscholar.org/paper/b065e134b25924cb2fd5e621345d8646ca61bae8>

Olasehinde-Williams. (2024). Carbon pricing and aggregate macroeconomic performance in the Eurozone: a contribution to the climate policy debate using the EU ETS and Macroeconomic Performance Index. **. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32676-5>.

Oliveira, Gurgel, & Tonry. (2020). The effects of a linked carbon emissions trading scheme for Latin America. **. <https://doi.org/10.1080/14693062.2019.1670610>.

Peng, Sun, Hao, An, & Lyu. (2024). Carbon emissions trading in ground transportation: Status quo, policy analysis, and outlook. **. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104225>.

Romano, Tocchi, Tinessa, Marzano, & Simonelli. (2022). Analysis of the carbon footprint of freight transport in the mass market retail sector: a case study in Campania (Italy). <https://doi.org/10.1109/EEEIC/ICPSEurope54979.2022.9854699>

Scotti, Flori, Crescenzi, & Pammolli. (2024). Demand-pull and technology-push environmental innovation: a policy mix analysis on EU ETS and EU Cohesion Policy. **. <https://doi.org/10.1080/14693062.2024.2366894>.

Setyawati, & Wibawa. (2024). Investigating the Impacts of Carbon Pricing Mechanism on CCS development in ASEAN countries. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1395/1/012034>

Steckel, Dorband, Montrone, Ward, Missbach, Hafner, Jakob, & Renner. (2021). Distributional impacts of carbon pricing in developing Asia. **. <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00758-8>.

Timilsina. (2018). Carbon pricing for climate change mitigation.. **. <https://doi.org/10.1079/pavsnr201813008>.

Traeger, & Balu. (2024). *Report on the Future Contribution of Ocean NETs in Different Climate Policies.* https://doi.org/10.3289/oceannets_d1.7

Vallés, Reneses, & Campos. (2012). Impact of the EU ETS on the European electricity sector. <https://doi.org/10.1109/EEM.2012.6254801>

Wang. (2023). Review of EU Maritime Transport Greenhouse Gas Emissions Reduction Policies: Better Prospects for Policy Makers in China?. **. <https://doi.org/10.25236/ijfs.2023.050920>.

Wang. (2024). Effect Analysis of China's Carbon Emission Trading Pilot Policy on Carbon Emission Control. **. <https://doi.org/10.54254/2754-1169/75/20241750>.

Wu, Tambunlertchai, & Pornchaiwiseskul. (2020). Examining the Impact and Influencing Channels of Emission Trading Pilot Markets in China. [https://doi.org/10.35609/gcbssproceeding.2020.11\(136\)](https://doi.org/10.35609/gcbssproceeding.2020.11(136))

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>.

Zeng, Weishaar, & Vedder. (2018). Electricity regulation in the Chinese national emissions trading scheme (ETS): lessons for carbon leakage and linkage with the EU ETS. **. <https://doi.org/10.1080/14693062.2018.1426553>.