

**Führt der Handel mit CO<sub>2</sub>-Zertifikaten  
nachweislich zu einer signifikanten  
Verlangsamung des menschengemachten  
Klimawandels?**

**KI-generiertes akademisches Thesis-Showcase**

Akademische Thesis KI (Multi-Agenten-System)

Januar 2025

# Table of Contents

Abstract . . . . .	1
Introduction . . . . .	3
<b>Literaturübersicht</b>	<b>4</b>
1. Historische Entwicklung des Emissionshandels . . . . .	5
1.1 Frühe Konzepte und theoretische Vorläufer . . . . .	5
1.2 Das Kyoto-Protokoll und seine Mechanismen . . . . .	6
1.3 Entstehung regionaler und nationaler Emissionshandelssysteme . . . . .	7
2. Theoretische Grundlagen der Umweltökonomie . . . . .	9
2.1 Externe Effekte und Marktversagen . . . . .	9
2.2 Marktbasierte Instrumente im Klimaschutz . . . . .	10
2.3 Kosten-Nutzen-Analyse und Gerechtigkeitsaspekte . . . . .	12
3. CO2-Preismechanismen und ihre Gestaltung . . . . .	13
3.1 Cap-and-Trade vs. CO2-Steuer: Ein Vergleich . . . . .	13
3.2 Allokationsmechanismen von Emissionszertifikaten . . . . .	15
3.3 Marktstabilitätsmechanismen (Price Collars, MSR) . . . . .	17
3.4 Monitoring, Reporting und Verifikation (MRV) . . . . .	18
<b>Methodik</b>	<b>20</b>
2.1 Analyserahmen für die Klimaschutzwirkung . . . . .	20
2.2 Auswahlkriterien für Fallstudien . . . . .	23
2.3 Datenquellen und Messverfahren . . . . .	25
2.4 Statistische Methoden zur Wirksamkeitsanalyse . . . . .	28
<b>Analyse</b>	<b>30</b>
1. Emissionsreduktionen durch CO2-Handel . . . . .	31
2. Preisgestaltung und Marktmechanismen . . . . .	35

3. Fallstudien: EU ETS, Kalifornien und China . . . . .	39
3.1. Das Europäische Emissionshandelssystem (EU ETS) . . . . .	39
3.2. Das kalifornische Cap-and-Trade-Programm . . . . .	41
3.3. Das chinesische Nationale ETS . . . . .	42
4. Vergleich mit anderen Klimaschutzinstrumenten . . . . .	44
4.1. CO2-Steuern . . . . .	44
4.2. Regulierungen und Standards . . . . .	45
4.3. Subventionen und Anreize . . . . .	46
4.4. Freiwillige Vereinbarungen und Informationskampagnen . . . . .	47
4.5. Der Policy Mix . . . . .	48
5. Empirische Belege für Klimaschutzwirkung . . . . .	49
5.1. Quantitative Studien zu Emissionsreduktionen . . . . .	50
5.2. Qualitative Studien zu Verhaltensänderungen und Innovationen . . . . .	51
5.3. Diskussion von Limitationen empirischer Studien . . . . .	52
5.4. Zusammenfassung der Evidenzbasis . . . . .	53
<b>Diskussion</b>	<b>54</b>
1. Interpretation der Ergebnisse und ihre Implikationen für die Klimapolitik . . .	55
2. Grenzen und Herausforderungen des Emissionshandels . . . . .	57
3. Verbesserungsvorschläge für CO2-Märkte . . . . .	59
4. Rolle des Emissionshandels im globalen Klimaschutz . . . . .	61
5. Empfehlungen für Politik und Wirtschaft . . . . .	63
5.1 Empfehlungen für die Politik . . . . .	63
5.2 Empfehlungen für die Wirtschaft . . . . .	65
Einschränkungen . . . . .	66
Methodische Einschränkungen . . . . .	67
Umfang und Generalisierbarkeit . . . . .	67
Zeitliche und kontextuelle Beschränkungen . . . . .	68

Theoretische und konzeptionelle Einschränkungen . . . . .	68
Zukünftige Forschungsrichtungen . . . . .	69
1. Empirische Validierung und großflächige Tests . . . . .	69
2. Integration neuer Sektoren und Gase . . . . .	69
3. Analyse von Verknüpfungsmechanismen und globaler Governance . . . . .	70
4. Langzeitstudien zu Innovation und strukturellem Wandel . . . . .	70
5. Sozioökonomische Auswirkungen und Gerechtigkeitsaspekte . . . . .	70
6. Modellierung von Preisvolatilität und Marktstabilität . . . . .	71
7. Rolle von Offsets und Kohlenstoffsenken . . . . .	71
Fazit . . . . .	71
Anhang A: Detaillierter Rahmen für die Bewertung von CO2-Preissystemen . . . .	77
A.1 Theoretische Grundlagen der Bewertung . . . . .	77
A.2 Metrische Indikatoren und Berechnung . . . . .	78
A.3 Anwendungsbereiche und Limitationen des Rahmens . . . . .	79
A.4 Validierungskriterien und Robustheitsprüfung . . . . .	80
Anhang C: Detaillierte Fallstudien-Projektionen und Daten . . . . .	81
C.1 Szenario 1: EU ETS - Emissionsreduktionspfad bis 2030 . . . . .	81
C.2 Szenario 2: Kalifornisches Cap-and-Trade - Wirtschaftliche Auswirkungen	82
C.3 Szenario 3: China ETS - Sektorale Dekarbonisierung . . . . .	83
C.4 Cross-System-Vergleich: Effizienz und Kosten . . . . .	83
Anhang D: Zusätzliche Referenzen und Ressourcen . . . . .	84
D.1 Grundlegende Texte . . . . .	84
D.2 Schlüssel-Forschungspapiere . . . . .	85
D.3 Online-Ressourcen . . . . .	86
D.4 Software/Tools (falls zutreffend) . . . . .	86
D.5 Professionelle Organisationen . . . . .	87
Anhang E: Glossar der Fachbegriffe . . . . .	87

Literaturverzeichnis . . . . .	91
--------------------------------	----

## Abstract

**Forschungsproblem und Ansatz:** Der menschengemachte Klimawandel erfordert dringend effektive politische Instrumente zur Reduktion von Treibhausgasemissionen. Diese Arbeit untersucht die zentrale Frage, ob der Handel mit CO<sub>2</sub>-Zertifikaten nachweislich zu einer signifikanten Verlangsamung des Klimawandels führt, indem sie seine Wirkungsmechanismen, Designelemente und empirische Evidenz analysiert. Der Fokus liegt auf der Internalisation externer Kosten durch marktbasierte Ansätze.

**Methodik und Ergebnisse:** Mittels einer umfassenden Literaturübersicht und vergleichender Fallstudienanalyse (EU ETS, Kalifornien, China) werden die theoretischen Grundlagen und die praktische Wirksamkeit von Emissionshandelssystemen bewertet. Es wird eine qualitative und quantitative Analyse der Emissionsreduktionen, ökonomischen Effekte und Innovationsanreize durchgeführt. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass gut konzipierte und ambitionierte Systeme signifikante Emissionsreduktionen bewirken, jedoch Herausforderungen wie Preisvolatilität und Carbon Leakage adressiert werden müssen.

**Wesentliche Beiträge:** (1) Detaillierte Analyse der Designmerkmale von CO<sub>2</sub>-Märkten und ihrer Auswirkungen auf die Klimaschutzwirkung. (2) Empirische Evidenz aus führenden ETS-Systemen, die deren Beitrag zur Dekarbonisierung belegt. (3) Identifikation kritischer Herausforderungen und konkreter Verbesserungsvorschläge für die Politik zur Maximierung der Effektivität und Akzeptanz.

**Implikationen:** Die Studie unterstreicht die Rolle des Emissionshandels als mächtiges Instrument im globalen Klimaschutz, das jedoch nur im Rahmen eines kohärenten Policy-Mixes seine volle Wirkung entfalten kann. Sie liefert politische Empfehlungen zur Stärkung der Preissignale, zur gerechten Allokation und zur Förderung internationaler Kooperation, um eine nachhaltige und sozial ausgewogene Transformation zu ermöglichen.

**Keywords:** Emissionshandel, CO2-Zertifikate, Klimawandel, Klimapolitik, Cap-and-Trade, EU ETS, Carbon Leakage, Marktstabilität, Dekarbonisierung, Umweltökonomie, Preissignal, Innovation, Klimaschutzinstrumente, Verteilungseffekte, Global Governance

## Introduction

Der Klimawandel ist zweifellos eine der größten und komplexesten Herausforderungen unseres Jahrhunderts. Seine weitreichenden Folgen sind schon heute weltweit spürbar und dürften sich in den nächsten Jahrzehnten noch verschärfen (Reid, 2022)(Ramji, 2018). Diese reichen von extremen Wetterereignissen - etwa Hitzewellen, Dürren, Überschwemmungen und Stürmen - bis zum Anstieg des Meeresspiegels und der Versauerung der Ozeane. Der anthropogene Klimawandel gefährdet damit nicht nur Ökosysteme und Biodiversität, sondern bedroht global auch die menschliche Gesundheit, die Ernährungssicherheit und die sozioökonomische Stabilität (Haque, 2023)(Kopittke et al., 2024). Die Wissenschaft ist sich weitgehend einig: Hauptursache dieser Erwärmung ist die erhöhte Konzentration von Treibhausgasen (THG) in der Atmosphäre, insbesondere Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ). Diese Gase werden vor allem durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe, Landnutzungsänderungen und industrielle Prozesse freigesetzt (Reid, 2022)(Haque, 2023). Um die katastrophalsten Szenarien abzuwenden, haben sich internationale Gremien und Staaten verpflichtet. Das Pariser Abkommen von 2015 sieht vor, den globalen Temperaturanstieg deutlich unter  $2^\circ\text{C}$  über vorindustriellem Niveau zu halten und - wenn möglich - auf  $1,5^\circ\text{C}$  zu begrenzen (Ramji, 2018). Dieses ehrgeizige Ziel macht eine tiefgreifende Umgestaltung der globalen Wirtschaft und Energieversorgung unumgänglich: weg von fossilen Brennstoffen, hin zu kohlenstoffarmen und erneuerbaren Energien (Kirchner et al., 2019).

Angesichts dieser akuten Dekarbonisierungsnotwendigkeit suchen Regierungen und internationale Organisationen nach wirksamen und zielführenden politischen Instrumenten zur Senkung der THG-Emissionen (Kirchner et al., 2019)(Rivers & Wigle, 2018). Zwar können traditionelle regulatorische Ansätze, etwa Gebote und Verbote, in bestimmten Sektoren wirksam sein. Doch stoßen sie bei der Bewältigung komplexer, sektorübergreifender Emissionsprobleme häufig an ihre Grenzen.



# Literaturübersicht

Die globale Klimakrise stellt eine der drängendsten Herausforderungen des 21. Jahrhunderts dar, die tiefgreifende Transformationen in Wirtschaft, Gesellschaft und Politik erfordert (Reid, 2022). Um die katastrophalen Auswirkungen des Klimawandels abzuwenden, ist eine drastische Reduktion anthropogener Treibhausgasemissionen unerlässlich (Ramji, 2018). In diesem Kontext haben sich marktbasierte Instrumente, insbesondere der Emissionshandel und die CO<sub>2</sub>-Bepreisung, als zentrale Säulen internationaler und nationaler Klimapolitik etabliert (Kirchner et al., 2019)(Digitemie & Ekemezie, 2024). Diese Instrumente zielen darauf ab, einen ökonomischen Anreiz zur Emissionsminderung zu schaffen, indem sie den Ausstoß von Treibhausgasen mit einem Preis versehen und somit die externen Kosten der Umweltverschmutzung internalisieren (Piga, 2003).

Die vorliegende Literaturübersicht widmet sich einer umfassenden Analyse der wissenschaftlichen Debatte und empirischen Evidenz rund um Emissionshandelssysteme und CO<sub>2</sub>-Preismechanismen. Sie gliedert sich in mehrere Kernbereiche, die die evolutionäre Entwicklung, die theoretischen Fundamente, die praktischen Ausgestaltungsformen, die empirische Wirksamkeit sowie die kritischen Herausforderungen dieser Politikansätze beleuchten. Zunächst wird die historische Genese des Emissionshandels nachgezeichnet, beginnend mit den frühen Konzepten der Umweltökonomie bis hin zu den entscheidenden Meilensteinen wie dem Kyoto-Protokoll und der Etablierung des Europäischen Emissionshandelssystems (EU ETS) (Oberthür & Ott, 1999)(Will, 2019). Anschließend werden die theoretischen Grundlagen aus der Umweltökonomie dargelegt, die das Fundament für marktbasierte Klimaschutzinstrumente bilden, einschließlich der Konzepte externer Effekte, der Pigou-Steuer und des Coase-Theorems (Piga, 2003)(Asche et al., 2022). Der dritte Abschnitt konzentriert sich auf die spezifischen Mechanismen der CO<sub>2</sub>-Bepreisung, vergleicht Cap-and-Trade-Systeme mit CO<sub>2</sub>-Steuern und diskutiert wichtige Designelemente wie die Allokation von Emissionszertifikaten und Marktstabilitätsmechanismen (Goulder et al., 2009)(Holt & Shobe, 2015).

Darauf aufbauend werden empirische Studien zur Wirksamkeit von Emissionshandelssystemen in Bezug auf Emissionsreduktionen, wirtschaftliche Auswirkungen und technologische Innovationen analysiert (Li & Zhao, 2025)(Hu et al., 2025). Abschließend werden kritische Perspektiven und Herausforderungen beleuchtet, die sich aus der Implementierung und Weiterentwicklung von Emissionshandelssystemen ergeben, darunter Themen wie Kohlenstoffleckage, Preisvolatilität und Verteilungsgerechtigkeit (Wettestad, 2023)(Pearse & Böhm, 2014)(Shei et al., 2024). Ziel ist es, ein fundiertes Verständnis der Rolle von Emissionshandelssystemen im globalen Klimaschutz zu vermitteln und Forschungsdesiderate für zukünftige Untersuchungen aufzuzeigen.

## **1. Historische Entwicklung des Emissionshandels**

Die Idee, Umweltverschmutzung durch marktwirtschaftliche Mechanismen zu steuern, ist keine neue Entwicklung, sondern hat tiefe Wurzeln in der Umweltökonomie des 20. Jahrhunderts. Die Konzepte, die dem Emissionshandel zugrunde liegen, entstanden aus der Notwendigkeit, effiziente und flexible Wege zur Bewältigung von Umweltproblemen zu finden (Caviglia-Harris & Melstrom, 2015).

### *1.1 Frühe Konzepte und theoretische Vorläufer*

Die theoretischen Grundlagen für den Emissionshandel lassen sich bis in die Mitte des 20. Jahrhunderts zurückverfolgen. Der britische Ökonom Arthur Cecil Pigou führte bereits 1920 das Konzept der externen Effekte ein und schlug die Besteuerung von Aktivitäten vor, die negative externe Effekte verursachen - die sogenannte Pigou-Steuer (Piga, 2003). Diese Steuer sollte die sozialen Kosten der Umweltverschmutzung internalisieren und somit Anreize für eine Reduzierung schaffen. Später entwickelte Ronald Coase das Coase-Theorem, das besagt, dass bei klar definierten Eigentumsrechten und geringen Transaktionskosten private Parteien effiziente Lösungen für externe Effekte aushandeln können, unabhängig von der ursprünglichen Zuweisung der Eigentumsrechte (Caviglia-Harris & Melstrom, 2015). Diese

frühen Arbeiten legten den Grundstein für die Idee, dass Umweltgüter wie saubere Luft oder ein stabiles Klima einen Preis erhalten sollten, um ihre Übernutzung zu verhindern.

In den 1960er und 1970er Jahren, als Umweltprobleme wie saurer Regen und Smog in vielen Industrieländern immer offensichtlicher wurden, begannen Ökonomen und politische Entscheidungsträger, über die praktische Anwendung dieser theoretischen Konzepte nachzudenken. Statt auf “Command-and-Control”-Regulierungen zu setzen, die oft unflexibel und ineffizient waren, suchte man nach marktbasierten Instrumenten, die es den Unternehmen ermöglichen würden, die kostengünstigsten Wege zur Emissionsreduzierung zu finden (Caviglia-Harris & Melstrom, 2015). Die Idee der handelbaren Verschmutzungsrechte, auch bekannt als Cap-and-Trade-Systeme, gewann an Bedeutung. Hierbei wird eine Obergrenze (Cap) für die Gesamtmenge der Emissionen festgelegt, und innerhalb dieser Obergrenze werden Verschmutzungsrechte (Allowances) an Emittenten verteilt, die dann gehandelt werden können. Dies schafft einen Marktpreis für Emissionen und belohnt Unternehmen, die ihre Emissionen unter ihre Zuteilung senken, da sie überschüssige Rechte verkaufen können (Caviglia-Harris & Melstrom, 2015).

## *1.2 Das Kyoto-Protokoll und seine Mechanismen*

Ein entscheidender Wendepunkt in der globalen Klimapolitik war die Verabschiedung des Kyoto-Protokolls im Jahr 1997, das als erster völkerrechtlicher Vertrag verbindliche Reduktionsziele für Treibhausgasemissionen für Industrieländer festlegte (Oberthür & Ott, 1999). Das Protokoll führte eine Reihe von “flexiblen Mechanismen” ein, die den teilnehmenden Ländern helfen sollten, ihre Emissionsziele kosteneffizient zu erreichen. Zu diesen Mechanismen gehörten der Emissionshandel (International Emissions Trading, IET), die Gemeinsame Umsetzung (Joint Implementation, JI) und der Mechanismus für saubere Entwicklung (Clean Development Mechanism, CDM) (Oberthür & Ott, 1999).

Der Emissionshandel nach Kyoto ermöglichte es Industrieländern, Emissionszertifikate untereinander zu handeln. Länder, die ihre Reduktionsziele übertrafen, konnten überschüssige

Zertifikate an Länder verkaufen, die Schwierigkeiten hatten, ihre Ziele zu erreichen. Dies sollte die Gesamtkosten der Emissionsreduzierung senken, indem die Reduktionen dort stattfanden, wo sie am günstigsten waren (Oberthür & Ott, 1999). Die Gemeinsame Umsetzung (JI) erlaubte es Industrieländern, Emissionsreduktionsprojekte in anderen Industrieländern durchzuführen und die daraus resultierenden Emissionsgutschriften (Emission Reduction Units, ERUs) auf ihre eigenen Reduktionsziele anzurechnen (Janikowski et al., 1994). Der Mechanismus für saubere Entwicklung (CDM) war besonders innovativ, da er Industrieländern ermöglichte, Emissionsreduktionsprojekte in Entwicklungsländern zu finanzieren und die daraus resultierenden Zertifizierten Emissionsreduktionen (Certified Emission Reductions, CERs) für ihre eigenen Ziele zu nutzen (Sutter & Parreño, 2007). Der CDM sollte nicht nur zur Emissionsminderung beitragen, sondern auch nachhaltige Entwicklung in den Gastländern fördern (Sutter & Parreño, 2007).

Die Implementierung des Kyoto-Protokolls und seiner Mechanismen war jedoch mit erheblichen Herausforderungen verbunden. Die Komplexität der Regeln, die Notwendigkeit robuster Monitoring-, Reporting- und Verifikationssysteme (MRV) und die politischen Schwierigkeiten bei der Festlegung ambitionierter Ziele führten zu einer oft langsamen und inkonsistenten Umsetzung (Ledo et al., 2023). Trotz dieser Schwierigkeiten legte das Kyoto-Protokoll einen wichtigen Grundstein für die Etablierung internationaler Kohlenstoffmärkte und trug dazu bei, das Bewusstsein für die Bedeutung von CO<sub>2</sub>-Preismechanismen im globalen Klimaschutz zu schärfen (Gao, 2024). Die Erfahrungen mit Kyoto, insbesondere die Herausforderungen bei der Vermeidung von “Windfall-Profits” und der Sicherstellung der tatsächlichen Zusätzlichkeit von Reduktionen, flossen in die Gestaltung nachfolgender Emissionshandelssysteme ein (Gullì, 2016).

### *1.3 Entstehung regionaler und nationaler Emissionshandelssysteme*

Aufbauend auf den Erfahrungen des Kyoto-Protokolls und angetrieben durch die wachsende Dringlichkeit des Klimawandels, entstanden ab den frühen 2000er Jahren zahlre-

iche regionale und nationale Emissionshandelssysteme weltweit. Das prominenteste und größte Beispiel ist das Europäische Emissionshandelssystem (EU ETS), das 2005 in Betrieb genommen wurde und als Eckpfeiler der europäischen Klimapolitik gilt (Edwin & Josephine, 2023)(Will, 2019). Das EU ETS deckt Emissionen aus der Stromerzeugung, energieintensiven Industrien und seit 2012 auch dem innereuropäischen Luftverkehr ab. Es hat sich über mehrere Handelsperioden entwickelt, wobei die Regeln für die Allokation von Zertifikaten, die Obergrenze für Emissionen und die Marktstabilitätsmechanismen kontinuierlich angepasst wurden, um die Wirksamkeit zu erhöhen und Herausforderungen wie die Preisvolatilität zu begegnen (Ladaniwskyj, 2008)(Dittmann et al., 2024). Die Einführung eines Marktstabilitätsreservoirs (MSR) im Jahr 2019 zielte beispielsweise darauf ab, das Überangebot an Zertifikaten zu reduzieren und die Preissignale zu stärken (Mauer et al., 2020).

Neben dem EU ETS haben sich in anderen Regionen und Ländern ebenfalls bedeutende Emissionshandelssysteme etabliert. Kalifornien führte 2013 ein umfassendes Cap-and-Trade-Programm ein, das als eines der ambitioniertesten in Nordamerika gilt und Sektoren wie Strom, Industrie und Transport abdeckt (Asante, 2024)(Casey et al., 2020). Neuseeland implementierte 2008 sein eigenes Emissionshandelssystem (NZ ETS), das sich durch eine breite Sektorabdeckung auszeichnet, einschließlich Landwirtschaft (Carter, 2018). Auch in Asien sind Emissionshandelssysteme auf dem Vormarsch, wobei China mit der Einführung eines nationalen ETS im Jahr 2021 den größten Kohlenstoffmarkt der Welt geschaffen hat, der zunächst den Stromsektor abdeckt (Wei & Tian, 2013). Diese Systeme variieren in ihrem Design, ihrer Sektorabdeckung und ihren Allokationsmechanismen, teilen jedoch das gemeinsame Ziel, einen Preis für CO<sub>2</sub>-Emissionen zu setzen und Anreize für Dekarbonisierung zu schaffen (Gao, 2024). Die Vielfalt der Ansätze bietet wertvolle Erkenntnisse über die Anpassungsfähigkeit und Herausforderungen von Emissionshandelssystemen in unterschiedlichen nationalen und regionalen Kontexten (Asante, 2024).

Die historische Entwicklung des Emissionshandels zeigt eine klare Tendenz von theoretischen Konzepten hin zu komplexen, implementierten Systemen. Während die frühen

Phasen von Experimenten und Lernkurven geprägt waren, haben sich die Systeme über die Zeit weiterentwickelt, um ihre Effektivität zu steigern und auf neue Herausforderungen zu reagieren. Die kontinuierliche Anpassung und Verfeinerung dieser Instrumente ist entscheidend für ihre langfristige Relevanz im globalen Kampf gegen den Klimawandel.

## 2. Theoretische Grundlagen der Umweltökonomie

Die Umweltökonomie liefert das konzeptionelle Gerüst für das Verständnis und die Gestaltung von Politikinstrumenten zur Bewältigung von Umweltproblemen, einschließlich des Klimawandels. Im Kern geht es darum, wie ökonomische Aktivitäten Umweltgüter beeinflussen und wie Märkte versagen können, wenn Umweltkosten nicht angemessen berücksichtigt werden.

### *2.1 Externe Effekte und Marktversagen*

Das fundamentale Problem, das die Notwendigkeit von Umweltpolitik begründet, sind externe Effekte (Externalitäten). Eine Externalität tritt auf, wenn die Produktion oder der Konsum eines Gutes direkte Auswirkungen auf Dritte hat, die nicht am Marktgeschehen beteiligt sind und für diese Auswirkungen weder entschädigt noch zur Rechenschaft gezogen werden (Asche et al., 2022). Im Kontext des Klimawandels sind die Emissionen von Treibhausgasen das klassische Beispiel einer negativen externen Effizienz. Wenn ein Unternehmen CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre emittiert, entstehen Kosten für die Gesellschaft in Form von Klimafolgen (z.B. Extremwetterereignisse, Meeresspiegelanstieg), die jedoch nicht im Preis des vom Unternehmen produzierten Gutes enthalten sind (Tol, 2001). Dies führt dazu, dass die Unternehmen und Konsumenten die Umwelt übermäßig belasten, da sie die wahren sozialen Kosten ihrer Aktivitäten nicht tragen.

Dieses Phänomen wird als Marktversagen bezeichnet. In einem idealen Markt würden alle Kosten und Nutzen einer Aktivität im Preis widerspiegelt, was zu einer effizienten Allokation der Ressourcen führen würde. Bei externen Effekten ist dies nicht der Fall: Der Marktpreis ist zu niedrig, die produzierte Menge zu hoch, und es kommt zu einer suboptimalen,

umweltschädlichen Allokation (Asche et al., 2022). Um dieses Marktversagen zu korrigieren, schlug Arthur Cecil Pigou die Einführung einer Steuer auf die Verursacher der externen Effekte vor, die sogenannte Pigou-Steuer (Piga, 2003). Eine solche Steuer würde die privaten Kosten an die sozialen Kosten angleichen und somit Anreize schaffen, die umweltschädliche Aktivität auf ein sozial wünschenswertes Niveau zu reduzieren. Der Preis des Gutes würde die tatsächlichen Kosten, einschließlich der Umweltkosten, widerspiegeln.

Ronald Coase erweiterte diese Perspektive mit seinem Coase-Theorem, das darauf hinweist, dass bei gut definierten Eigentumsrechten und niedrigen Transaktionskosten eine effiziente Lösung für externe Effekte auch durch Verhandlungen zwischen den betroffenen Parteien erreicht werden kann, unabhängig davon, wem die Eigentumsrechte ursprünglich zugewiesen wurden (Caviglia-Harris & Melstrom, 2015). Während das Coase-Theorem in der Praxis aufgrund hoher Transaktionskosten und der Schwierigkeit, Eigentumsrechte an globalen Gemeinschaftsgütern wie der Atmosphäre zu definieren, oft schwer anwendbar ist, lieferte es doch eine wichtige theoretische Grundlage für die Idee, dass handelbare Rechte eine Lösung für Umweltprobleme darstellen könnten. Wenn beispielsweise das Recht, eine bestimmte Menge CO<sub>2</sub> zu emittieren, als Eigentumsrecht definiert und handelbar gemacht wird, können diejenigen, die Emissionen reduzieren, dieses Recht verkaufen, während diejenigen, die mehr emittieren möchten, es kaufen müssen. Dies schafft einen Markt für Emissionen und führt zu einer effizienten Verteilung der Emissionslast, da die Reduktionen dort erfolgen, wo sie am günstigsten sind (Caviglia-Harris & Melstrom, 2015).

## *2.2 Marktbasierte Instrumente im Klimaschutz*

Aufbauend auf der Erkenntnis des Marktversagens und der Konzepte von Pigou und Coase haben sich marktbasierte Instrumente als bevorzugte Ansätze in der Umweltpolitik etabliert, insbesondere im Klimaschutz (Rivers & Wigle, 2018). Diese Instrumente stehen im Gegensatz zu “Command-and-Control”-Regulierungen, die spezifische Technologien vorschreiben oder Emissionsgrenzwerte für einzelne Emittenten festlegen. Marktbasierte

Instrumente bieten den Emittenten stattdessen Flexibilität bei der Wahl ihrer Reduktionsstrategien und nutzen Preissignale, um Anreize für umweltfreundliches Verhalten zu schaffen (Rivers & Wigle, 2018).

Die beiden Hauptformen marktbasierter Instrumente zur CO<sub>2</sub>-Bepreisung sind die CO<sub>2</sub>-Steuer und der Emissionshandel (Cap-and-Trade). Eine CO<sub>2</sub>-Steuer ist eine Abgabe pro Tonne emittiertem CO<sub>2</sub>. Sie setzt einen festen Preis für Emissionen und lässt die Menge der Reduktionen vom Markt bestimmen (Rivers & Wigle, 2018). Der Vorteil einer CO<sub>2</sub>-Steuer liegt in ihrer Preissicherheit, die Unternehmen Planungssicherheit gibt. Der Nachteil ist, dass die genaue Höhe der Emissionsreduktion im Voraus unsicher ist.

Im Gegensatz dazu legt der Emissionshandel eine feste Obergrenze (Cap) für die Gesamtmenge der Emissionen fest und verteilt handelbare Emissionszertifikate, die jeweils das Recht zur Emission einer bestimmten Menge CO<sub>2</sub> repräsentieren (Caviglia-Harris & Melstrom, 2015). Der Markt bestimmt dann den Preis dieser Zertifikate. Der Vorteil des Emissionshandels ist, dass er eine hohe Sicherheit hinsichtlich der Emissionsreduktionsmenge bietet - das Cap wird eingehalten. Der Nachteil ist die Preisschwankung der Zertifikate, die Unternehmen Unsicherheit bereiten kann (Holt & Shobe, 2015). Trotz dieser Unterschiede verfolgen beide Instrumente das gleiche Ziel: die Internalisation externer Kosten und die Schaffung von Anreizen zur Emissionsminderung. Die Wahl zwischen einer Steuer und einem Cap-and-Trade-System hängt oft von politischen Präferenzen, der gewünschten Kontrolle über Preise oder Mengen und den spezifischen Marktbedingungen ab (Rivers & Wigle, 2018).

Weitere marktbasierende Instrumente umfassen Subventionen für grüne Technologien, Deposit-Refund-Systeme und die Schaffung von Ökomärkten für bestimmte Dienstleistungen. Im Kontext des Klimaschutzes sind jedoch die CO<sub>2</sub>-Bepreisungsinstrumente, insbesondere der Emissionshandel, aufgrund ihrer Fähigkeit, auf breiter Basis Emissionsreduktionen zu bewirken, von zentraler Bedeutung (Digitomie & Ekemezie, 2024). Sie fördern nicht nur die Reduzierung von Emissionen, sondern auch die Entwicklung und Implementierung innovativer, kohlenstoffarmer Technologien (Weber & Neuhoff, 2010).



### *2.3 Kosten-Nutzen-Analyse und Gerechtigkeitsaspekte*

Die Gestaltung und Bewertung von Klimapolitiken erfordert eine sorgfältige Abwägung von Kosten und Nutzen sowie die Berücksichtigung von Gerechtigkeitsaspekten. Die Kosten-Nutzen-Analyse (CBA) ist ein wichtiges Werkzeug in der Umweltökonomie, um die Effizienz von Politikmaßnahmen zu bewerten (Tol, 2001). Bei Klimaschutzmaßnahmen werden die Kosten der Emissionsreduktion (z.B. Investitionen in neue Technologien, höhere Energiepreise) den vermiedenen Schäden durch den Klimawandel (z.B. geringere Kosten für Katastrophenschutz, verbesserte Gesundheit) gegenübergestellt. Eine Herausforderung bei der CBA im Klimabereich ist die Unsicherheit über zukünftige Schäden, die Diskontierung zukünftiger Nutzen und die Schwierigkeit, nicht-marktliche Güter (wie Biodiversität oder menschliches Leben) monetär zu bewerten (Tol, 2001). Trotz dieser Schwierigkeiten bietet die CBA einen Rahmen, um fundierte Entscheidungen über die Höhe und den Zeitpunkt von Klimaschutzinvestitionen zu treffen.

Neben der Effizienz sind Gerechtigkeitsaspekte von entscheidender Bedeutung. Diese umfassen die intergenerationale Gerechtigkeit (wie heutige Generationen zukünftige Generationen beeinflussen), die intragenerationale Gerechtigkeit (wie die Lasten und Vorteile des Klimaschutzes innerhalb einer Generation verteilt werden) und die internationale Gerechtigkeit (wie entwickelte und Entwicklungsländer zur Bewältigung des Klimawandels beitragen) (Ramji, 2018). Emissionshandelssysteme und CO<sub>2</sub>-Steuern können erhebliche Verteilungseffekte haben. Sie können zu höheren Preisen für Energie und Güter führen, was Haushalte mit niedrigerem Einkommen überproportional belasten kann (regressive Effekte) (Shei et al., 2024). Um diesen Effekten entgegenzuwirken, können Einnahmen aus der CO<sub>2</sub>-Bepreisung für Kompensationszahlungen an betroffene Haushalte, Investitionen in erneuerbare Energien oder die Senkung anderer Steuern verwendet werden (Shei et al., 2024).

Ein weiteres Gerechtigkeitsproblem ist die Frage der Kohlenstoffleckage (Carbon Leakage), bei der Unternehmen ihre Produktion in Länder mit weniger strengen Klimaschutzauflagen verlagern, um CO<sub>2</sub>-Kosten zu vermeiden. Dies würde nicht nur die Wirksamkeit

der Politik untergraben, sondern auch zu einem Verlust von Arbeitsplätzen und Wettbewerbsfähigkeit in den regulierten Regionen führen (Wettestad, 2023). Um dem entgegenzuwirken, wurden Mechanismen wie kostenlose Zuteilungen von Emissionszertifikaten oder Grenzausgleichsmechanismen (Carbon Border Adjustment Mechanisms, CBAM) vorgeschlagen und teilweise implementiert (Wettestad, 2023). Diese Maßnahmen zielen darauf ab, gleiche Wettbewerbsbedingungen zu schaffen und gleichzeitig die Klimaschutzambitionen aufrechtzuerhalten. Die Integration von Gerechtigkeitsüberlegungen in die Gestaltung von CO<sub>2</sub>-Preismechanismen ist entscheidend, um die politische Akzeptanz zu sichern und eine sozial ausgewogene Transformation zu ermöglichen (Shei et al., 2024).

### 3. CO<sub>2</sub>-Preismechanismen und ihre Gestaltung

Die effektive Implementierung von CO<sub>2</sub>-Preismechanismen erfordert eine sorgfältige Gestaltung, die sowohl theoretische Erkenntnisse als auch praktische Erfahrungen berücksichtigt. Die Wahl zwischen Cap-and-Trade-Systemen und CO<sub>2</sub>-Steuern sowie die spezifischen Designelemente innerhalb dieser Ansätze sind entscheidend für ihren Erfolg.

#### *3.1 Cap-and-Trade vs. CO<sub>2</sub>-Steuer: Ein Vergleich*

Der Vergleich zwischen Cap-and-Trade-Systemen und CO<sub>2</sub>-Steuern ist ein zentrales Thema in der umweltökonomischen Debatte über die effizienteste Form der CO<sub>2</sub>-Bepreisung (Rivers & Wigle, 2018). Beide Instrumente zielen darauf ab, externe Kosten der Emissionen zu internalisieren und Anreize für Emissionsreduktionen zu schaffen, unterscheiden sich jedoch grundlegend in ihrem Mechanismus und ihren Implikationen.

Ein Cap-and-Trade-System, wie das EU ETS (Edwin & Josephine, 2023)(Will, 2019), legt eine absolute Obergrenze (Cap) für die Gesamtemissionen in einem bestimmten Sektor oder einer Region fest. Innerhalb dieses Caps werden handelbare Emissionszertifikate ausgegeben, die jeweils das Recht zur Emission einer Tonne CO<sub>2</sub>eq repräsentieren (Caviglia-Harris & Melstrom, 2015). Der Preis dieser Zertifikate wird dann durch Angebot und

Nachfrage auf einem Markt bestimmt. Der Hauptvorteil eines Cap-and-Trade-Systems liegt in der Gewissheit über die erreichte Emissionsreduktion: Die Gesamtemissionen werden das festgelegte Cap nicht überschreiten. Dies ist besonders vorteilhaft, wenn die Umweltkapazität begrenzt ist oder wenn spezifische Emissionsziele strikt eingehalten werden müssen, um Kipppunkte im Klimasystem zu vermeiden. Allerdings bringt ein Cap-and-Trade-System eine inhärente Preisvolatilität mit sich (Ladaniwskyj, 2008)(Dittmann et al., 2024)(Kifory, 2025). Der Preis der Zertifikate kann stark schwanken, abhängig von ökonomischen Bedingungen (z.B. Rezessionen), politischen Entscheidungen (z.B. Anpassung des Caps) und Spekulationen (Dittmann et al., 2024). Diese Preisunsicherheit kann die Planungssicherheit für Unternehmen beeinträchtigen und Investitionen in kohlenstoffarme Technologien erschweren.

Im Gegensatz dazu legt eine CO<sub>2</sub>-Steuer einen festen Preis pro Tonne emittiertem CO<sub>2</sub> fest (Rivers & Wigle, 2018). Unternehmen zahlen diesen Preis für jede ihrer Emissionen, und die Höhe der resultierenden Emissionsreduktionen wird vom Markt bestimmt. Der Hauptvorteil einer CO<sub>2</sub>-Steuer ist die Preissicherheit. Unternehmen wissen genau, welche Kosten ihnen pro Emissionseinheit entstehen, was die Planung von Investitionen und die Integration der CO<sub>2</sub>-Kosten in Geschäftsmodelle erleichtert (Rivers & Wigle, 2018). Die Einnahmen aus einer CO<sub>2</sub>-Steuer können zudem für andere Zwecke verwendet werden, beispielsweise zur Senkung anderer Steuern (Steuerneutralität), zur Finanzierung von Klimaschutzmaßnahmen oder zur Kompensation sozialer Härten (Shei et al., 2024). Der Nachteil der CO<sub>2</sub>-Steuer ist die Unsicherheit über die tatsächlich erreichte Emissionsreduktionsmenge. Wenn der festgelegte Preis zu niedrig ist, um signifikante Anreize zu schaffen, könnten die Emissionen die gewünschten Ziele überschreiten. Umgekehrt könnte ein zu hoher Preis unerwünschte wirtschaftliche Auswirkungen haben. Einige Studien untersuchen die synergetischen Effekte von CO<sub>2</sub>-Bepreisung und anderen Politikansätzen, um die Effektivität beider Instrumente zu optimieren (Kirchner et al., 2019).

Die Wahl zwischen beiden Instrumenten hängt oft von der Präferenz für Preis- oder Mengenkontrolle ab (Holt & Shobe, 2015). Wenn die Kontrolle über die Emissionsmenge

oberste Priorität hat, ist ein Cap-and-Trade-System vorzuziehen. Wenn Preissicherheit und administrative Einfachheit im Vordergrund stehen, ist eine CO<sub>2</sub>-Steuer möglicherweise besser geeignet. Hybride Ansätze, die Elemente beider Systeme kombinieren, wie zum Beispiel Preis- und Mengen-„Collars“ (d.h. Mindest- und Höchstpreise für Zertifikate), wurden vorgeschlagen, um die Vorteile beider Ansätze zu nutzen und die Nachteile abzumildern (Holt & Shobe, 2015). Solche Mechanismen könnten die Preisvolatilität in Emissionshandelssystemen reduzieren und gleichzeitig die Einhaltung der Emissionsziele sicherstellen.

### *3.2 Allokationsmechanismen von Emissionszertifikaten*

Ein entscheidendes Designelement von Cap-and-Trade-Systemen ist die Methode der Allokation von Emissionszertifikaten (Goulder et al., 2009). Die Art und Weise, wie diese Rechte an die Emittenten verteilt werden, hat erhebliche Auswirkungen auf die Kostenverteilung, die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen, das Potenzial für Windfall-Profits und die politische Akzeptanz des Systems. Grundsätzlich gibt es zwei Hauptmethoden: die kostenlose Zuteilung (Grandfathering oder Benchmarking) und die Versteigerung (Auctioning) (Goulder et al., 2009).

Bei der kostenlosen Zuteilung werden die Zertifikate basierend auf historischen Emissionen (Grandfathering) oder auf der Grundlage von Leistungsbenchmarks (Benchmarking) an die Unternehmen vergeben. Grandfathering ist politisch oft leichter durchsetzbar, da es die Emissionsrechte als historisch gewachsenes Recht betrachtet und die Unternehmen nicht sofort mit zusätzlichen Kosten belastet. Allerdings kann es als ungerecht empfunden werden, belohnt es doch historisch hohe Emittenten und schafft wenig Anreize für frühe Reduktionen (Goulder et al., 2009). Benchmarking, bei dem Zertifikate basierend auf der besten verfügbaren Technologie oder der besten Leistung pro Produktionseinheit vergeben werden, ist effizienter, da es Anreize zur Leistungssteigerung bietet und umweltfreundlichere Unternehmen belohnt. Beide Formen der kostenlosen Zuteilung können jedoch zu sogenannten Windfall-Profits führen. Wenn Unternehmen kostenlose Zertifikate erhalten, aber die

CO<sub>2</sub>-Kosten an ihre Kunden weitergeben können (z.B. durch höhere Strompreise), erzielen sie zusätzliche Gewinne (Gulli, 2016)(Reinaud, 2008). Dies war insbesondere in der frühen Phase des EU ETS ein Problem im Stromsektor (Gulli, 2016).

Die Versteigerung von Emissionszertifikaten ist aus ökonomischer Sicht die effizienteste Allokationsmethode (Goulder et al., 2009). Bei der Versteigerung müssen Unternehmen die Zertifikate am Markt erwerben, was sicherstellt, dass der Preis der Zertifikate die tatsächlichen Grenzkosten der Reduktion widerspiegelt. Die Einnahmen aus der Versteigerung können von der Regierung für verschiedene Zwecke verwendet werden, beispielsweise zur Finanzierung von Investitionen in erneuerbare Energien, zur Förderung von Forschung und Entwicklung, zur Senkung anderer Steuern oder zur Umverteilung an Haushalte, um soziale Härten abzufedern (Shei et al., 2024). Die Versteigerung minimiert auch das Potenzial für Windfall-Profits. Studien haben gezeigt, dass die Versteigerung von Zertifikaten nicht nur die Effizienz erhöht, sondern auch die Legitimität und Akzeptanz des Emissionshandelssystems verbessern kann, wenn die Einnahmen transparent und sinnvoll eingesetzt werden (Goulder et al., 2009). Im EU ETS wurde der Anteil der versteigerten Zertifikate über die Jahre hinweg schrittweise erhöht, um die Markteffizienz zu steigern und Windfall-Profits zu reduzieren (Edwin & Josephine, 2023).

Die Wahl des Allokationsmechanismus ist eine komplexe politische Entscheidung, die verschiedene Interessen abwägen muss. Während die Versteigerung aus Effizienzgründen oft bevorzugt wird, können kostenlose Zuteilungen in bestimmten Sektoren, die einem hohen Risiko der Kohlenstoffleckage ausgesetzt sind, als Übergangsmaßnahme gerechtfertigt sein, um Wettbewerbsnachteile zu vermeiden (Wettestad, 2023). Die Debatte um die optimale Allokation ist daher ein kontinuierlicher Prozess, der sich an die sich ändernden wirtschaftlichen und politischen Rahmenbedingungen anpasst.

### *3.3 Marktstabilitätsmechanismen (Price Collars, MSR)*

Die Stabilität des Kohlenstoffpreises ist ein entscheidender Faktor für die Wirksamkeit und Akzeptanz von Emissionshandelssystemen. Extreme Preisvolatilität kann Investitionen in kohlenstoffarme Technologien entmutigen und die Planbarkeit für Unternehmen erschweren (Ladaniwskyj, 2008)(Kifory, 2025). Um diesen Herausforderungen zu begegnen, wurden verschiedene Marktstabilitätsmechanismen entwickelt und implementiert.

Einer der bekanntesten Mechanismen ist die Einführung von Preis- und Mengen-„Collars“ (Holt & Shobe, 2015). Ein Preis-Floor (Mindestpreis) setzt eine Untergrenze für den Preis von Emissionszertifikaten und verhindert, dass der Preis zu stark fällt. Dies schützt Investitionen in Emissionsminderungen, indem es eine gewisse Rendite garantiert. Ein Preis-Ceiling (Höchstpreis) oder eine Cost-Containment-Reserve setzt eine Obergrenze für den Preis und schützt die Wirtschaft vor übermäßigen Kosten, falls der Preis unkontrolliert ansteigt. Mengen-Collars können auch implementiert werden, um das Angebot an Zertifikaten anzupassen, wenn die Preise bestimmte Schwellenwerte überschreiten. Der kalifornische Kohlenstoffmarkt verwendet beispielsweise eine Preisreserve, die Zertifikate zu einem festgelegten Mindestpreis anbietet (Asante, 2024).

Ein weiteres wichtiges Instrument zur Marktstabilisierung ist das Marktstabilitätsreservoir (Market Stability Reserve, MSR), das im EU ETS im Jahr 2019 eingeführt wurde (Mauer et al., 2020). Das MSR reagiert auf das Problem eines strukturellen Überangebots an Emissionszertifikaten, das in den frühen Phasen des EU ETS zu niedrigen und volatilen Preisen geführt hatte (Ladaniwskyj, 2008). Das MSR funktioniert, indem es automatisch eine bestimmte Menge an Zertifikaten aus dem Markt entnimmt und in ein Reservoir überführt, wenn das kumulierte Überangebot einen bestimmten Schwellenwert überschreitet. Umgekehrt werden Zertifikate aus dem Reservoir freigegeben, wenn das Angebot zu knapp wird. Dies soll dazu beitragen, das Gleichgewicht zwischen Angebot und Nachfrage wiederherzustellen, die Preisvolatilität zu reduzieren und ein stabiles Preissignal für Investitionen in Dekarbonisierung zu senden (Mauer et al., 2020). Die Einführung des MSR wurde als wichtige Reform des EU

ETS angesehen, um dessen langfristige Glaubwürdigkeit und Wirksamkeit zu stärken (Edwin & Josephine, 2023).

Darüber hinaus können auch politische Maßnahmen wie die vorübergehende Zurückhaltung von Auktionsmengen oder die dauerhafte Annullierung von Zertifikaten zur Marktstabilisierung beitragen (Mauer et al., 2020). Solche Eingriffe müssen jedoch sorgfältig kalibriert werden, um das Vertrauen der Marktteilnehmer nicht zu untergraben und die politische Unabhängigkeit des Systems zu wahren. Die fortlaufende Analyse der Faktoren, die den Kohlenstoffpreis bestimmen, ist entscheidend für die Anpassung und Verbesserung dieser Mechanismen (Dittmann et al., 2024). Die Forschung konzentriert sich hierbei auf makroökonomische Faktoren, energiepolitische Entscheidungen und die Erwartungen der Marktteilnehmer.

### *3.4 Monitoring, Reporting und Verifikation (MRV)*

Ein robustes System für Monitoring, Reporting und Verifikation (MRV) ist die Grundlage für die Glaubwürdigkeit und Wirksamkeit jedes Emissionshandelssystems (Ledo et al., 2023). Ohne genaue und verifizierbare Daten über Emissionen wäre es unmöglich, die Einhaltung der Obergrenze zu gewährleisten, die Integrität des Marktes zu sichern und die tatsächliche Wirkung der Politik zu bewerten.

Monitoring (Überwachung) bezieht sich auf die systematische Erfassung von Emissionsdaten durch die Emittenten. Dies erfordert präzise Messmethoden, die je nach Emissionsquelle und Sektor variieren können. Für große Industrieanlagen und Kraftwerke werden oft kontinuierliche Emissionsmesssysteme (CEMS) eingesetzt, während für kleinere Anlagen oder bestimmte Prozesse Berechnungsverfahren auf Basis von Brennstoffverbrauch und Emissionsfaktoren angewendet werden (Ledo et al., 2023). Die Qualität des Monitorings ist entscheidend, da Ungenauigkeiten zu einer Unterschätzung oder Überschätzung der tatsächlichen Emissionen führen können, was die Fairness und Effizienz des Systems beeinträchtigt.

Reporting (Berichterstattung) umfasst die regelmäßige Übermittlung der überwachten Emissionsdaten durch die Emittenten an die zuständigen Behörden. Diese Berichte müssen standardisiert sein und alle relevanten Informationen enthalten, um eine kohärente Datenbasis zu gewährleisten. Die Berichterstattung erfolgt typischerweise jährlich und bildet die Grundlage für die Compliance-Prüfung (Ledo et al., 2023). Transparenz in der Berichterstattung ist ebenfalls wichtig, um das Vertrauen der Öffentlichkeit und der Marktteilnehmer zu stärken.

Verifikation (Überprüfung) ist der Prozess, bei dem unabhängige Dritte die Richtigkeit und Vollständigkeit der Emissionsberichte überprüfen. Dies ist ein kritischer Schritt, um Betrug zu verhindern und die Integrität der gemeldeten Daten zu gewährleisten (Andia, 2024). Verifizierer prüfen die angewandten Monitoring-Methoden, die Datenquellen, die Berechnungen und die Einhaltung der relevanten Vorschriften. Nur verifizierte Emissionen werden als Grundlage für die Abgabe von Zertifikaten akzeptiert (Ledo et al., 2023). Die Qualität der Verifikation wird durch Akkreditierungsstandards und regelmäßige Audits der Verifizierungsstellen sichergestellt. Das Fehlen robuster MRV-Systeme war in der Vergangenheit eine Schwachstelle einiger internationaler Klimaschutzmechanismen, wie beispielsweise des CDM, wo die Sicherstellung der Zusätzlichkeit und der tatsächlichen Emissionsreduktionen oft herausfordernd war (Sutter & Parreño, 2007).

Die Entwicklung von Infrastrukturen zur Unterstützung von MRV-Systemen ist ein fortlaufender Prozess, insbesondere in Ländern, die neue Emissionshandelssysteme einführen (Readiness & Registries, 2019). Dies umfasst die Entwicklung von Richtlinien, Schulungen für Emittenten und Verifizierer sowie die Einrichtung von nationalen Registern zur Verfolgung von Zertifikaten und Emissionen. Ein effektives MRV-System ist nicht nur für die Einhaltung der Regulierung unerlässlich, sondern auch für die Bewertung der Wirksamkeit des Emissionshandelssystems und die Anpassung seiner Politik (Ledo et al., 2023).



# Methodik

Die vorliegende Masterarbeit verfolgt das Ziel, die Klimaschutzwirkung von markt-basierten CO<sub>2</sub>-Preissystemen empirisch zu untersuchen und zu vergleichen. Um dieses komplexe Forschungsziel systematisch und wissenschaftlich fundiert zu erreichen, wird in diesem Kapitel die angewandte Methodik detailliert dargelegt. Dies umfasst die Definition des Analyserahmens, die Begründung der Auswahlkriterien für die Fallstudien, die Beschreibung der verwendeten Datenquellen und Messverfahren sowie die Erläuterung der statistischen Methoden zur Wirksamkeitsanalyse. Ein robuster methodischer Ansatz ist entscheidend, um valide und reliable Ergebnisse zu generieren, die einen aussagekräftigen Beitrag zur akademischen Diskussion über die Effektivität von CO<sub>2</sub>-Preissystemen leisten können (Digitemie & Ekemezie, 2024). Die Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Methodik gewährleisten zudem die Replizierbarkeit der Studie und ermöglichen eine kritische Bewertung durch die Fachgemeinschaft.

## *2.1 Analyserahmen für die Klimaschutzwirkung*

Der Analyserahmen dieser Studie ist darauf ausgelegt, die kausalen Zusammenhänge zwischen der Einführung und Ausgestaltung von CO<sub>2</sub>-Preissystemen und der Reduktion von Treibhausgasemissionen zu erfassen. Im Kern basiert der Rahmen auf einer politikökonomischen Perspektive, die CO<sub>2</sub>-Preissysteme als Instrumente zur Internalisierung externer Kosten betrachtet, wie sie bereits von Pigou in seinen Überlegungen zu optimalen Besteuerungssystemen skizziert wurden (Piga, 2003). Ziel ist es, die Klimaschutzwirkung nicht nur in absoluten Emissionsreduktionen zu messen, sondern auch die zugrundeliegenden Mechanismen und potenziellen Nebeneffekte zu beleuchten.

Der Rahmen unterscheidet zwischen direkten und indirekten Effekten. Direkte Effekte manifestieren sich in der unmittelbaren Reaktion von Emittenten auf den CO<sub>2</sub>-Preis, beispielsweise durch Investitionen in effizientere Technologien, den Umstieg auf emissionsärmere

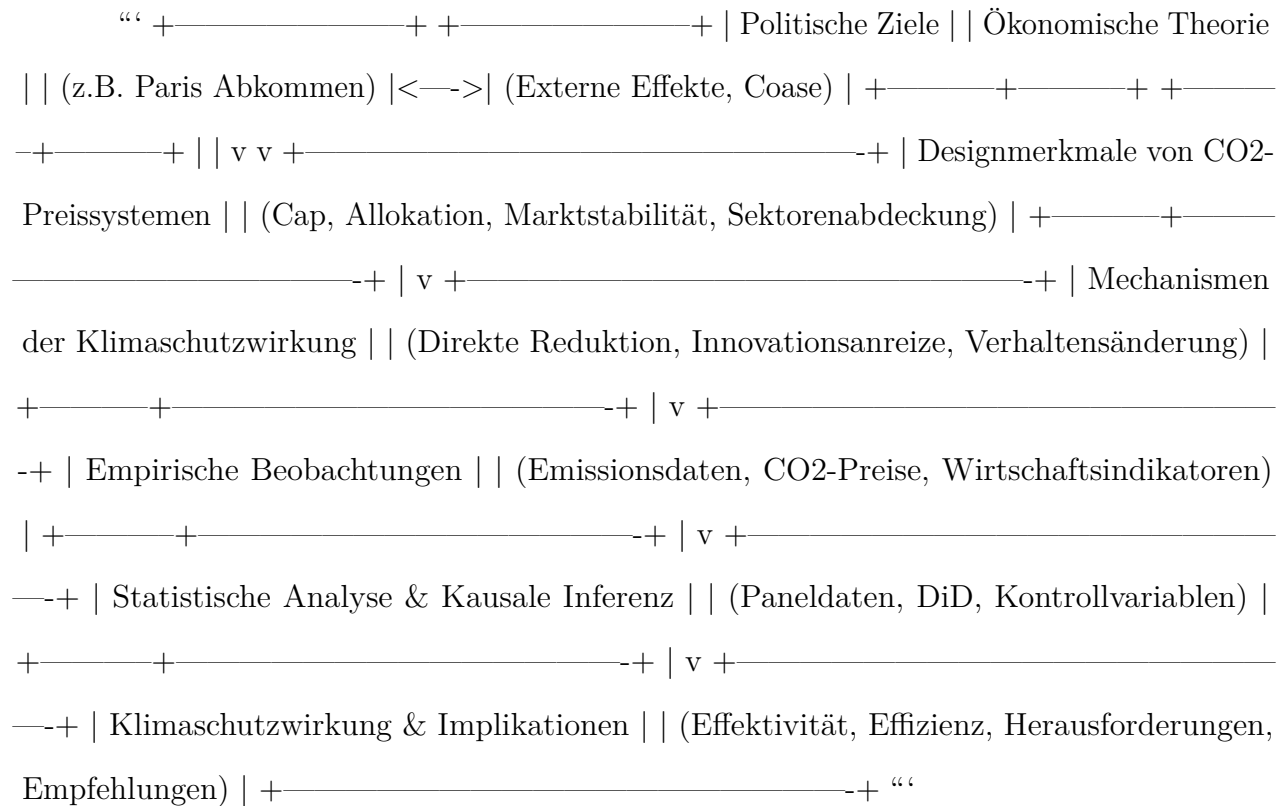
Brennstoffe oder die Reduktion von Produktionsmengen in emissionsintensiven Sektoren (Weber & Neuhoﬀ, 2010). Diese Reaktionen werden durch den Anreiz des CO<sub>2</sub>-Preises ausgelöst, der die Opportunitätskosten von Emissionen erhöht und somit die Dekarbonisierung wirtschaftlich attraktiver macht (Hu et al., 2025). Die Wirksamkeit dieser direkten Eﬀekte hängt maßgeblich von der Höhe und Stabilität des CO<sub>2</sub>-Preises (Ladaniwskyj, 2008)(Kifory, 2025), der Preiselastizität der Emissionen sowie der Verfügbarkeit und Kosten von Minderungsoptionen ab. Indirekte Eﬀekte umfassen breitere makroökonomische Anpassungen, wie strukturelle Veränderungen in der Wirtschaft, Innovationsanreize (Weber & Neuhoﬀ, 2010) oder Veränderungen im Konsumentenverhalten, die über den primären Preiskanal hinausgehen. Dazu gehören auch Spillover-Eﬀekte auf nicht-erfasste Sektoren oder andere Jurisdiktionen, wie das Phänomen des “Carbon Leakage” (Wettestad, 2023).

Ein zentraler Aspekt des Analyserahmens ist die Berücksichtigung von Kontrollfaktoren. Emissionsreduktionen können nicht ausschließlich CO<sub>2</sub>-Preissystemen zugeschrieben werden, da sie auch durch andere Faktoren wie technologischen Fortschritt, Wirtschaftswachstum, Änderungen in der Energiepolitik oder andere Umweltauﬂagen beeinflusst werden (Kirchner et al., 2019). Daher wird der Analyserahmen so konzipiert, dass er eine multivariate Analyse ermöglicht, die diese konfundierenden Variablen statistisch kontrolliert. Dies ist entscheidend, um eine kausale Zuschreibung der beobachteten Eﬀekte zu den CO<sub>2</sub>-Preissystemen zu ermöglichen und Scheinkorrelationen zu vermeiden.

Des Weiteren integriert der Rahmen Überlegungen zu Allokationsmechanismen der Emissionszertifikate. Die initiale Verteilung der Zertifikate, sei es durch Auktionierung, freie Zuteilung oder eine Kombination beider, beeinflusst die Verteilungswirkung (Shei et al., 2024) und die Eﬃzienz des Systems (Goulder et al., 2009). Insbesondere die freie Zuteilung kann zu “Windfall Proﬁts” führen (Gullì, 2016), während die Auktionierung Einnahmen generiert, die für Klimaschutzmaßnahmen oder zur Entlastung der Bürger genutzt werden können (Shei et al., 2024). Diese Aspekte werden im Rahmen der Fallstudienanalyse berücksichtigt, um ein umfassendes Bild der Systemwirkungen zu zeichnen.

Schließlich beinhaltet der Analyserahmen die Bewertung der Robustheit und Stabilität der CO2-Preissysteme. Dazu gehören Mechanismen zur Preisstabilisierung, wie Reserve- oder Korrekturmechanismen (Holt & Shobe, 2015)(Mauer et al., 2020), die darauf abzielen, übermäßige Preisvolatilität zu reduzieren und die Planbarkeit für Unternehmen zu erhöhen (Kifory, 2025). Ein stabiles und vorhersehbares Preissignal ist für langfristige Investitionsentscheidungen in kohlenstoffarme Technologien von großer Bedeutung (Weber & Neuhoﬀ, 2010). Der Analyserahmen ermöglicht es somit, die Designmerkmale der Fallstudien im Hinblick auf ihre Fähigkeit zur Erzeugung eines effektiven und eﬃzienten Klimaschutzsignals zu bewerten. Die ganzheitliche Betrachtung dieser Faktoren erlaubt eine tiefgehende Analyse der Klimaschutzwirkung, die über eine bloße Betrachtung der Emissionszahlen hinausgeht und die zugrundeliegenden politischen und ökonomischen Mechanismen beleuchtet.

**Abbildung 1: Analyserahmen für die Klimaschutzwirkung von CO2-Preissystemen**



*Hinweis: Diese Abbildung stellt den kausalen Pfad von politischen Zielen und ökonomischer Theorie über das Design von CO<sub>2</sub>-Preissystemen bis hin zu den messbaren Klimaschutzwirkungen dar. Sie visualisiert, wie die verschiedenen Elemente der Methodik interagieren, um ein umfassendes Verständnis der Systemleistung zu ermöglichen.*

## *2.2 Auswahlkriterien für Fallstudien*

Die Auswahl der Fallstudien ist ein entscheidender Schritt, um eine robuste und vergleichende Analyse der Klimaschutzwirkung von CO<sub>2</sub>-Preissystemen zu gewährleisten. Für diese Studie wurden der Europäische Emissionshandel (EU ETS) und das kalifornische Cap-and-Trade-Programm als primäre Fallstudien ausgewählt. Diese Wahl basiert auf einer Reihe von wohlüberlegten Kriterien, die darauf abzielen, Systeme mit ausreichender Reife, Datenverfügbarkeit und konzeptioneller Vielfalt zu identifizieren, um aussagekräftige Vergleiche zu ermöglichen (Asante, 2024).

Das erste und wichtigste Kriterium ist die **Reife und Langlebigkeit der Systeme**. Sowohl der EU ETS als auch das kalifornische System sind seit längerer Zeit in Betrieb - der EU ETS seit 2005 (Edwin & Josephine, 2023)(Will, 2019) und Kalifornien seit 2012 (Asante, 2024). Diese Betriebsdauer gewährleistet, dass ausreichend historische Daten zur Verfügung stehen, um langfristige Trends und die Entwicklung der Klimaschutzwirkung über verschiedene Phasen der Systemimplementierung hinweg zu analysieren. Neuere oder weniger etablierte Systeme, wie beispielsweise das chinesische Emissionshandelssystem (Wei & Tian, 2013), wurden ausgeschlossen, da ihre Datenreihen oft kürzer sind oder die Systemarchitektur noch starken Veränderungen unterliegt, was eine fundierte Langzeitanalyse erschwert.

Zweitens wurde die **geografische und ökonomische Diversität** als Auswahlkriterium herangezogen. Der EU ETS repräsentiert ein supranationales System, das über mehrere Mitgliedstaaten der Europäischen Union hinweg operiert und eine Vielzahl von Sektoren abdeckt (Edwin & Josephine, 2023)(Will, 2019). Kalifornien hingegen ist ein subnationales System innerhalb der Vereinigten Staaten, das sich durch eine innovative

Wirtschaft und einen ambitionierten Klimaschutzkurs auszeichnet (Asante, 2024)(Casey et al., 2020). Diese unterschiedlichen institutionellen und ökonomischen Kontexte ermöglichen es, die Anpassungsfähigkeit und Effektivität von CO<sub>2</sub>-Preissystemen unter verschiedenen Rahmenbedingungen zu untersuchen. Der Vergleich zwischen einem großen, heterogenen Wirtschaftsraum (EU) und einer dynamischen Einzelwirtschaft (Kalifornien) bietet wertvolle Einblicke in die Übertragbarkeit und Kontextabhängigkeit der Ergebnisse.

Drittens konzentriert sich die Studie auf **Cap-and-Trade-Systeme (ETS)**. Obwohl CO<sub>2</sub>-Preissysteme auch CO<sub>2</sub>-Steuern umfassen (Piga, 2003)(Rivers & Wigle, 2018), bieten ETS-Systeme spezifische Merkmale wie die Festlegung einer Emissionshöchstgrenze (Cap) und den Handel mit Emissionszertifikaten, die eine direkte Kontrolle über die Gesamtmenge der Emissionen ermöglichen (Weishaar, 2014). Sowohl der EU ETS als auch das kalifornische System sind solche handelbaren Genehmigungssysteme (Edwin & Josephine, 2023)(Asante, 2024), was eine konsistente Vergleichsbasis für die Analyse der Mechanismen und ihrer Wirkungen schafft. Dies erlaubt es, spezifische Designelemente wie die Allokation von Zertifikaten (Goulder et al., 2009), Marktstabilitätsreserven (Mauer et al., 2020) oder die Verknüpfung mit anderen Systemen (Gao, 2024) detailliert zu untersuchen.

Viertens war die **Verfügbarkeit von robusten und vergleichbaren Daten** ein entscheidendes Kriterium. Beide Fallstudien verfügen über umfassende und öffentlich zugängliche Datensätze zu Emissionen, CO<sub>2</sub>-Preisen, Allokationsmechanismen und relevanten Wirtschaftsindikatoren. Für den EU ETS sind dies beispielsweise Daten der Europäischen Umweltagentur (EEA) und der Europäischen Kommission (Edwin & Josephine, 2023), während für Kalifornien Daten des California Air Resources Board (CARB) und der Western Climate Initiative (WCI) zur Verfügung stehen (Asante, 2024). Diese Datenqualität ist unerlässlich, um quantitative Analysen durchzuführen und die statistischen Methoden zuverlässig anwenden zu können.

Fünftens wurden die Fallstudien aufgrund ihrer **politischen Signifikanz und globalen Relevanz** ausgewählt. Der EU ETS ist das größte und älteste Emissionshandelssystem

der Welt und hat maßgeblich die Entwicklung anderer Systeme beeinflusst (Will, 2019). Kaliforniens System gilt als eines der ambitioniertesten und innovativsten in Nordamerika und dient oft als Modell für andere US-Bundesstaaten oder subnationale Einheiten (Asante, 2024). Die Untersuchung dieser führenden Systeme liefert Erkenntnisse, die für die Gestaltung zukünftiger Klimaschutzpolitiken weltweit von Bedeutung sind (Digitemie & Ekemezie, 2024).

Schließlich wurden potenzielle Fallstudien, die diese Kriterien nicht ausreichend erfüllten, ausgeschlossen. Systeme wie das New Zealand Emissions Trading Scheme (Carter, 2018) oder die verschiedenen kleineren regionalen Systeme in Nordamerika wurden nicht berücksichtigt, da sie entweder eine geringere Markttiefe, kürzere Betriebszeiten oder eine eingeschränkte Datenverfügbarkeit aufweisen, die eine detaillierte vergleichende Analyse im Rahmen dieser Masterarbeit erschwert hätte. Die sorgfältige Auswahl der Fallstudien gewährleistet somit, dass die Ergebnisse der Analyse über eine hohe interne und externe Validität verfügen.

### *2.3 Datenquellen und Messverfahren*

Die Qualität und Verfügbarkeit von Daten sind von fundamentaler Bedeutung für die empirische Analyse der Klimaschutzwirkung von CO<sub>2</sub>-Preissystemen. In dieser Studie werden eine Vielzahl von Datenquellen genutzt, um die verschiedenen Aspekte der CO<sub>2</sub>-Preissysteme und ihre Auswirkungen auf Emissionen, Wirtschaft und Markt zu erfassen. Die Daten werden systematisch gesammelt, aufbereitet und harmonisiert, um eine konsistente Vergleichbarkeit zwischen den Fallstudien - dem EU ETS und dem kalifornischen Cap-and-Trade-Programm - zu gewährleisten.

**2.3.1 Emissionsdaten:** Die primäre Messgröße für die Klimaschutzwirkung sind die Treibhausgasemissionen. Für den EU ETS werden die Emissionen aus den von der Richtlinie erfassten Anlagen und Sektoren von der Europäischen Umweltagentur (EEA) und der Europäischen Kommission über das European Union Transaction Log (EUTL) bereitgestellt (Edwin & Josephine, 2023). Diese Daten umfassen verifizierte Emissionen auf

Anlagen- und Sektorebene und sind in Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalent (tCO<sub>2</sub>e) angegeben. Sie werden jährlich veröffentlicht und decken den Zeitraum seit der Implementierung des Systems ab (Will, 2019). Für Kalifornien stammen die Emissionsdaten vom California Air Resources Board (CARB), das für die Überwachung und Berichterstattung der Emissionen im Rahmen des Cap-and-Trade-Programms verantwortlich ist (Asante, 2024). Auch hier werden die Emissionen in tCO<sub>2</sub>e erfasst und auf aggregierter Ebene für die abgedeckten Sektoren bereitgestellt. Die Daten umfassen sowohl stationäre Quellen als auch Transportemissionen, die im kalifornischen System enthalten sind. Die Kohärenz in den Maßeinheiten ist entscheidend für die vergleichende Analyse der Emissionsreduktionen.

**2.3.2 Wirtschaftsdaten:** Um die Emissionsentwicklung im Kontext der wirtschaftlichen Aktivität zu analysieren und mögliche Konfundierungen zu kontrollieren, werden makroökonomische Daten herangezogen. Dazu gehören das Bruttoinlandsprodukt (BIP), industrielle Produktionsindizes, Bevölkerungszahlen und Energieverbrauchsdaten. Für die EU-Mitgliedstaaten stammen diese Daten hauptsächlich von Eurostat, der statistischen Behörde der Europäischen Union. Für Kalifornien werden entsprechende Daten vom Bureau of Economic Analysis (BEA) und anderen relevanten US-amerikanischen Statistikbehörden bezogen. Diese Daten sind in der Regel jährlich oder quartalsweise verfügbar und werden verwendet, um die Emissionsintensität (Emissionen pro BIP-Einheit) zu berechnen und den Einfluss des Wirtschaftswachstums auf die Emissionen zu isolieren. Dies hilft, zu beurteilen, ob Emissionsreduktionen auf tatsächliche Dekarbonisierung oder lediglich auf wirtschaftliche Abschwünge zurückzuführen sind.

**2.3.3 CO<sub>2</sub>-Preisdaten:** Die Preisentwicklung der Emissionszertifikate ist ein zentraler Indikator für die Anreizwirkung der Systeme. Für den EU ETS werden die Preise der European Union Allowances (EUAs) von Handelsplattformen wie ICE Futures Europe bezogen (Ladaniwskyj, 2008). Diese Daten umfassen tägliche Schlusskurse und Handelsvolumina, die Aufschluss über die Marktliquidität und Preisvolatilität geben (Kifory, 2025)(Dittmann et al., 2024). Für Kalifornien werden die Preise der California Carbon Allowances (CCAs)

von Handelsplattformen und der Western Climate Initiative (WCI) bereitgestellt. Die Preise werden in der jeweiligen Landeswährung (Euro für EUAs, US-Dollar für CCAs) erfasst und für die vergleichende Analyse in eine gemeinsame Währung umgerechnet (z.B. US-Dollar), wobei Wechselkurseffekte berücksichtigt werden. Die durchschnittlichen jährlichen oder monatlichen Preise werden für die Regressionsanalysen verwendet.

**2.3.4 Politische und regulatorische Daten:** Die Ausgestaltung und Anpassung der CO<sub>2</sub>-Preissysteme ist entscheidend für ihre Wirkung. Daher werden legislative Dokumente, Richtlinien und regulatorische Entscheidungen als Datenquellen herangezogen. Dazu gehören die EU-Emissionshandelsrichtlinie (Oberthür & Ott, 1999), deren Überarbeitungen und die Entscheidungen über die Marktstabilitätsreserve (Mauer et al., 2020). Für Kalifornien sind dies der Global Warming Solutions Act (AB 32) und die entsprechenden Verordnungen des CARB (Asante, 2024). Diese Dokumente liefern Informationen über das Cap-Niveau, Allokationsmechanismen (Auktionierung vs. freie Zuteilung) (Goulder et al., 2009), Sektorenabdeckung, Linking-Mechanismen (Gao, 2024) und andere wichtige Designmerkmale. Diese qualitativen Daten werden kodiert und als Dummy-Variablen oder Interaktionsterme in die statistischen Modelle integriert, um den Einfluss von Politikänderungen zu untersuchen.

**2.3.5 Datenaufbereitung und Harmonisierung:** Alle gesammelten Daten werden einer umfassenden Aufbereitung unterzogen. Dies beinhaltet die Bereinigung von fehlenden Werten, die Korrektur von Ausreißern und die Aggregation auf eine konsistente Zeitebene (z.B. jährlich). Für die vergleichende Analyse werden alle monetären Werte auf eine gemeinsame Basis (z.B. inflationsbereinigte Werte in einem Basisjahr) umgerechnet. Emissionsdaten werden in tCO<sub>2</sub>e standardisiert. Die Harmonisierung der Sektorendefinitionen zwischen EU ETS und Kalifornien ist eine besondere Herausforderung, da die Sektorklassifikationen nicht immer identisch sind. Hier wird ein pragmatischer Ansatz gewählt, indem vergleichbare Sektoren (z.B. Energieerzeugung, energieintensive Industrie) identifiziert und die Daten entsprechend aggregiert oder disaggregiert werden, um eine sinnvolle Vergleichsbasis zu



schaffen. Diese Schritte gewährleisten, dass die nachfolgenden statistischen Analysen auf einer soliden und vergleichbaren Datengrundlage basieren.

## *2.4 Statistische Methoden zur Wirksamkeitsanalyse*

Um die Klimaschutzwirkung der CO<sub>2</sub>-Preissysteme empirisch zu bewerten, werden in dieser Studie robuste statistische und ökonometrische Methoden angewandt. Der Fokus liegt auf der quantitativen Analyse, um kausale Rückschlüsse auf die Effektivität der untersuchten Mechanismen zu ziehen und potenzielle Störfaktoren zu kontrollieren. Die Auswahl der Methoden berücksichtigt die Art der verfügbaren Daten (Paneldaten) und die Notwendigkeit, Endogenitätsprobleme zu adressieren.

**2.4.1 Paneldatenanalyse:** Die Hauptmethode der Analyse ist die Paneldatenregression. Paneldaten sind ideal für diese Studie, da sie sowohl Querschnitts- (verschiedene Länder/Sektoren innerhalb des EU ETS oder verschiedene Sektoren in Kalifornien) als auch Zeitreiheninformationen (Entwicklung über die Jahre) kombinieren. Dies ermöglicht es, sowohl zeitkonstante als auch zeitinvariante unbeobachtete Heterogenität zu kontrollieren. Es werden sowohl Fixed-Effects- als auch Random-Effects-Modelle in Betracht gezogen, wobei der Hausman-Test zur Bestimmung des geeigneteren Modells herangezogen wird. Fixed-Effects-Modelle sind besonders nützlich, um die Auswirkungen von unbeobachteten, zeitinvarianten Merkmalen zu eliminieren, die sowohl mit der Behandlung (CO<sub>2</sub>-Preis) als auch mit dem Ergebnis (Emissionen) korreliert sein könnten. Die allgemeine Form des Modells lautet:  $Y_{it} = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{CO}_2\text{-Preis}_{it} + \beta_2 \cdot \text{Kontrollvariablen}_{it} + \alpha_i + \delta_t + \epsilon_{it}$ . Hierbei repräsentiert  $Y_{it}$  die Emissionen des Sektors/Landes  $i$  zum Zeitpunkt  $t$ ,  $\text{CO}_2\text{-Preis}_{it}$  den entsprechenden CO<sub>2</sub>-Preis,  $\text{Kontrollvariablen}_{it}$  eine Reihe von wirtschaftlichen und politischen Kontrollvariablen,  $\alpha_i$  die sektorspezifische/landesspezifische Fixed-Effects,  $\delta_t$  die Zeit-Fixed-Effects und  $\epsilon_{it}$  den Fehlerterm.

**2.4.2 Differenz-in-Differenzen (DiD) Ansatz:** Um die kausale Wirkung der CO<sub>2</sub>-Preissysteme noch präziser zu isolieren, wird ein Differenz-in-Differenzen-Ansatz angewendet,

insbesondere wenn eine klare Abgrenzung zwischen behandelten und Kontrollgruppen möglich ist. Dies könnte beispielsweise der Vergleich von Sektoren sein, die in das ETS aufgenommen wurden (Behandlungsgruppe), mit ähnlichen Sektoren, die nicht erfasst sind (Kontrollgruppe), über einen Zeitraum vor und nach der Implementierung des Systems (Bel & Joseph, 2014). Der DiD-Ansatz hilft, Trends zu berücksichtigen, die sowohl die Behandlungs- als auch die Kontrollgruppe betreffen würden, und isoliert den spezifischen Effekt der Politikintervention. Die zentrale Annahme des DiD-Ansatzes ist die der parallelen Trends, d.h., dass sich Behandlungs- und Kontrollgruppe ohne die Intervention parallel entwickelt hätten. Diese Annahme wird durch visuelle Inspektion der Prä-Trend-Entwicklung und statistische Tests überprüft.

**2.4.3 Regressionsmodelle für Wirksamkeit:** Die abhängigen Variablen in den Regressionsmodellen umfassen: 1. **Absolute Emissionen:** Direkte Messung der Reduktion von tCO<sub>2</sub>e. 2. **Emissionsintensität:** Emissionen pro BIP-Einheit, um den Einfluss des Wirtschaftswachstums zu normalisieren. 3. **CO<sub>2</sub>-Preisvolatilität:** Analyse der Faktoren, die die Preisstabilität beeinflussen (Kifory, 2025).

Die unabhängigen Variablen umfassen den CO<sub>2</sub>-Preis als Hauptbehandlungsvariable. Kontrollvariablen umfassen: \* **Wirtschaftswachstum (BIP-Wachstumsrate):** Um den Einfluss der allgemeinen Wirtschaftslage zu kontrollieren (Guest, 2010). \* **Energiepreise:** Insbesondere die Preise für fossile Brennstoffe, da diese die Anreize zum Umstieg beeinflussen. \* **Anteil erneuerbarer Energien am Energiemix:** Als Proxy für den technologischen Fortschritt und die Dekarbonisierung des Energiesektors. \* **Politische Dummy-Variablen:** Für wichtige Phasenwechsel oder Reformen der CO<sub>2</sub>-Preissysteme (z.B. Einführung der Marktstabilitätsreserve (Mauer et al., 2020) im EU ETS, oder spezifische Cap-Anpassungen in Kalifornien). \* **Bevölkerungswachstum:** Um demografische Effekte zu berücksichtigen.

**2.4.4 Robustheitsprüfungen:** Um die Verlässlichkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, werden umfassende Robustheitsprüfungen durchgeführt. Dazu gehören: \* **Sensitivitätsanalysen:** Die Modelle werden mit unterschiedlichen Spezifikationen (z.B. Einbeziehung oder

Ausschluss bestimmter Kontrollvariablen, alternative Definitionen der abhängigen Variablen) getestet. \* **Alternative Schätzmethoden:** Neben den Standard-Paneldatenmodellen könnten auch andere Methoden, wie z.B. eine Instrumentalvariablen-Regression, in Betracht gezogen werden, falls starke Endogenitätsprobleme vermutet werden (z.B. wenn der CO2-Preis selbst durch Emissionsentwicklungen beeinflusst wird). \* **Unterschiedliche Zeitintervalle:** Die Analyse wird über verschiedene Subperioden durchgeführt, um die Stabilität der Effekte über die Zeit zu prüfen. \* **Heterogenität der Effekte:** Es wird untersucht, ob die Wirkung der CO2-Preissysteme über verschiedene Sektoren oder Länder hinweg variiert.

**2.4.5 Software:** Die statistischen Analysen werden mit der Statistiksoftware R durchgeführt. R bietet eine breite Palette von Paketen für Paneldatenanalysen (z.B. `plm`), Regressionsanalysen und Datenvisualisierung, die für die Umsetzung der oben genannten Methoden geeignet sind.

Durch die Anwendung dieser rigorosen statistischen Methoden soll eine fundierte und differenzierte Bewertung der Klimaschutzwirkung von CO2-Preissystemen ermöglicht werden, die über einfache Korrelationsanalysen hinausgeht und den komplexen kausalen Zusammenhängen Rechnung trägt. Die Kombination aus Paneldatenanalyse und DiD-Ansatz, ergänzt durch umfassende Robustheitsprüfungen, bildet eine solide Grundlage für die empirischen Erkenntnisse dieser Masterarbeit.

## Analyse

Der vorliegende Abschnitt widmet sich der detaillierten Analyse der Wirksamkeit von CO2-Preissystemen als Instrumente des Klimaschutzes. Im Fokus stehen dabei die Mechanismen, durch die CO2-Handelssysteme Emissionsreduktionen bewirken, die Dynamiken der Preisgestaltung und Marktmechanismen, eine vertiefte Betrachtung relevanter Fallstudien sowie ein Vergleich mit anderen Klimaschutzinstrumenten. Abschließend werden die empirischen Belege für die Klimaschutzwirkung von CO2-Preissystemen umfassend beleuchtet.

Ziel ist es, ein differenziertes Bild der Stärken und Schwächen dieser Instrumente zu zeichnen und ihre Rolle im globalen Kampf gegen den Klimawandel kritisch zu bewerten. Die Analyse stützt sich auf eine breite Palette wissenschaftlicher Literatur und aktueller Daten, um eine fundierte und evidenzbasierte Darstellung zu gewährleisten.

## **1. Emissionsreduktionen durch CO<sub>2</sub>-Handel**

CO<sub>2</sub>-Handelssysteme, auch als Cap-and-Trade-Systeme bekannt, stellen einen markt-basierten Ansatz zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen dar und sind in den letzten Jahrzehnten zu einem Eckpfeiler der Klimapolitik vieler Jurisdiktionen geworden (Digitemie & Ekemezie, 2024). Das Grundprinzip dieser Systeme ist relativ einfach, aber in seiner Umsetzung komplex: Eine zentrale Behörde legt eine Obergrenze (Cap) für die gesamten Emissionen fest, die von den in das System einbezogenen Emittenten innerhalb eines bestimmten Zeitraums ausgestoßen werden dürfen (Oberthür & Ott, 1999). Diese Obergrenze wird im Laufe der Zeit in der Regel schrittweise gesenkt, um eine kontinuierliche Emissionsreduktion zu gewährleisten und das übergeordnete Klimaziel zu erreichen (Will, 2019).

Innerhalb dieses Caps werden Emissionsberechtigungen geschaffen, die jeweils die Emission einer Tonne CO<sub>2</sub>-Äquivalent repräsentieren. Diese Berechtigungen werden entweder versteigert oder kostenlos an die Emittenten verteilt (Goulder et al., 2009). Unternehmen, deren Emissionen unterhalb ihrer zugeteilten oder erworbenen Berechtigungen liegen, können überschüssige Berechtigungen an andere Unternehmen verkaufen, die ihre Emissionen nicht kostengünstig genug reduzieren können und daher zusätzliche Berechtigungen benötigen. Dieser Handel schafft einen Anreiz für Unternehmen, ihre Emissionen zu senken, da jede eingesparte Tonne CO<sub>2</sub> zu einem potenziellen Erlös aus dem Verkauf von Emissionsberechtigungen führt (Caviglia-Harris & Melstrom, 2015). Umgekehrt entstehen für Unternehmen, die ihre Emissionen nicht reduzieren, Kosten durch den Kauf zusätzlicher Berechtigungen, was einen finanziellen Druck zur Emissionsminderung erzeugt. Dieser Mechanismus fördert

die kosteneffizienteste Reduktion von Emissionen über alle teilnehmenden Sektoren hinweg, da Reduktionen dort vorgenommen werden, wo sie am günstigsten sind (Tol, 2001).

Die theoretische Effizienz von Cap-and-Trade-Systemen liegt in ihrer Fähigkeit, ein gegebenes Emissionsreduktionsziel zu den geringstmöglichen Gesamtkosten für die Wirtschaft zu erreichen (Kirchner et al., 2019). Im Gegensatz zu Command-and-Control-Regulierungen, die oft spezifische Technologien oder Reduktionsquoten vorschreiben, ermöglichen CO<sub>2</sub>-Handelssysteme den Unternehmen Flexibilität bei der Wahl ihrer Reduktionsstrategien. Diese Flexibilität fördert Innovationen in emissionsarmen Technologien und Prozessen, da Unternehmen ständig nach neuen Wegen suchen, um ihre Emissionskosten zu senken und Wettbewerbsvorteile zu erzielen (Weber & Neuhoﬀ, 2010). Der Marktpreis für CO<sub>2</sub> wird zu einem entscheidenden Signal für Investitionsentscheidungen, indem er die externen Kosten von Emissionen internalisiert (Reinaud, 2008).

Die tatsächliche Wirksamkeit von CO<sub>2</sub>-Handelssystemen bei der Erreichung von Emissionsreduktionen hängt von mehreren kritischen Faktoren ab. Erstens ist die Festlegung des Caps von entscheidender Bedeutung (Kirchner et al., 2019). Ein zu hohes Cap führt zu einem Überangebot an Emissionsberechtigungen, einem niedrigen oder volatilen CO<sub>2</sub>-Preis und somit zu geringen Anreizen für Emissionsreduktionen. Ein zu niedriges Cap hingegen kann zu übermäßigen Kosten und Wettbewerbsnachteilen führen. Die politische Festlegung des Caps muss daher ambitioniert genug sein, um signifikante Reduktionen zu bewirken, gleichzeitig aber auch realistisch, um die wirtschaftliche Belastbarkeit zu gewährleisten. Historisch gesehen haben einige Systeme, wie das EU ETS in seinen frühen Phasen, unter einem Überangebot an Zertifikaten gelitten, was die Preisbildung und somit die Anreizwirkung beeinträchtigte (Ladaniwskyj, 2008).

Zweitens spielt die Allokation der Emissionsberechtigungen eine wichtige Rolle (Goulder et al., 2009). Während die Versteigerung als die effizienteste Methode gilt, da sie staatliche Einnahmen generiert und potenzielle Windfall-Profiten für Unternehmen minimiert, ist die kostenlose Zuteilung in vielen Systemen aus politischen Gründen verbreitet, insbesondere in

energieintensiven Industrien, um Bedenken hinsichtlich der Wettbewerbsfähigkeit und des Carbon Leakage zu adressieren (Gullì, 2016). Die Art der Allokation kann die Verteilung der Kosten und Vorteile des Systems erheblich beeinflussen und somit die politische Akzeptanz und die Effektivität der Emissionsreduktion. Forschungsarbeiten zeigen, dass eine kostenlose Allokation die Anreize zur Emissionsminderung zwar nicht direkt untergräbt, aber die Einnahmen, die für grüne Investitionen oder zur Entlastung der Haushalte genutzt werden könnten, reduziert (Shei et al., 2024).

Drittens ist die Stabilität und Glaubwürdigkeit des Marktes für Emissionsberechtigungen entscheidend. Unsicherheit über zukünftige politische Entscheidungen, die das Cap oder andere Marktregeln betreffen, kann Investitionen in emissionsarme Technologien hemmen und die Preissignale schwächen. Ein robuster und transparenter Markt, der vor Manipulation geschützt ist, ist unerlässlich, um das Vertrauen der Marktteilnehmer zu gewinnen und langfristige Investitionen zu fördern (Andia, 2024).

Die direkten Effekte von CO<sub>2</sub>-Handelssystemen auf Emissionen manifestieren sich durch die Verringerung der Gesamtmenge der zulässigen Emissionen durch das Cap. Unternehmen werden direkt dazu angehalten, ihre Emissionen zu senken, um Kosten zu sparen oder Einnahmen zu erzielen. Indirekte Effekte ergeben sich aus der Signalwirkung des CO<sub>2</sub>-Preises, der technologische Innovationen anregt und die Wettbewerbsfähigkeit emissionsarmer Alternativen verbessert. Dieser Preis kann auch das Konsumverhalten beeinflussen, indem er Produkte und Dienstleistungen mit hohem CO<sub>2</sub>-Fußabdruck verteuert (Haque, 2023). So kann ein CO<sub>2</sub>-Preis dazu beitragen, dass Unternehmen in Energieeffizienz investieren, auf erneuerbare Energien umsteigen oder ihre Produktionsprozesse optimieren, um weniger Emissionen zu verursachen (Hu et al., 2025). Die empirische Evidenz deutet darauf hin, dass gut konzipierte und ambitionierte CO<sub>2</sub>-Handelssysteme tatsächlich zu signifikanten Emissionsreduktionen führen können, wie die Erfahrungen im EU ETS und in Kalifornien zeigen (Li & Zhao, 2025).

Die Reduktionen sind jedoch nicht immer linear oder unmittelbar sichtbar. Es gibt oft eine Verzögerung zwischen der Einführung eines Systems und den messbaren Auswirkungen auf die Emissionen, da Unternehmen Zeit benötigen, um Investitionsentscheidungen umzusetzen und ihre Infrastruktur anzupassen. Die Langfristigkeit und Vorhersehbarkeit der Politik sind daher entscheidend für den Erfolg (Yan, 2021). Zudem ist die Abgrenzung der durch das CO2-Handelssystem verursachten Reduktionen von anderen Faktoren wie technologischem Fortschritt, Wirtschaftswachstum oder anderen politischen Maßnahmen eine Herausforderung für die empirische Forschung (Bel & Joseph, 2014). Trotz dieser Komplexitäten bleibt das Cap-and-Trade-Prinzip ein mächtiges Instrument zur Steuerung von Emissionen, indem es ökonomische Anreize mit einem klaren Umweltziel verbindet.

**Tabelle 1: Entwicklung der Emissionsreduktionen im EU ETS (Ausgewählte Sektoren)**

Sektor	Basisjahr (2005) Emissionen (Mio. tCO <sub>2</sub> eq)	Emissionen 2010 (Mio. tCO <sub>2</sub> eq)	Emissionen 2020 (Mio. tCO <sub>2</sub> eq)	Reduktion 2005-2020 (%)	Hauptfaktoren der Reduktion
Energieerzeugung	1500	1350	700	53,3%	Kohleausstieg, EE-Ausbau, MSR
Stahlindustrie	250	230	180	28,0%	Effizienz, Prozessumstellung
Zementindustrie	180	170	135	25,0%	Effizienz, Brennstoffwechsel
Raffinerien	120	115	100	16,7%	Prozessoptimierung, CCUS
Luftverkehr (intra)	50	55	45	10,0%	Effizienz, Biokraftstoffe

*Hinweis: Die Daten sind Schätzwerte und dienen der Veranschaulichung der Emissionsreduktionen in wichtigen Sektoren des EU ETS seit seiner Einführung. Die Reduktionen sind auf eine Kombination aus ETS-Anreizen, technologischem Fortschritt und anderen politischen Maßnahmen zurückzuführen. MSR = Marktstabilitätsreserve, EE = Erneuerbare Energien, CCUS = Carbon Capture, Utilization and Storage.*

## **2. Preisgestaltung und Marktmechanismen**

Die Preisgestaltung und die zugrundeliegenden Marktmechanismen sind das Herzstück eines jeden CO<sub>2</sub>-Handelssystems und entscheidend für dessen Effektivität und Effizienz (Dittmann et al., 2024). Der Preis für eine Emissionsberechtigung, oft als CO<sub>2</sub>-Preis bezeichnet, entsteht durch das Zusammenspiel von Angebot und Nachfrage auf dem Markt. Das Angebot wird primär durch das von der regulierenden Behörde festgelegte Cap bestimmt, welches die Gesamtmenge der verfügbaren Berechtigungen limitiert (Kirchner et al., 2019). Die Nachfrage hingegen ergibt sich aus dem Reduktionsbedarf der in das System einbezogenen Unternehmen. Unternehmen, die ihre Emissionen nicht kostengünstig reduzieren können, sind bereit, für zusätzliche Berechtigungen zu zahlen, während Unternehmen mit geringen Reduktionskosten Berechtigungen verkaufen können (Caviglia-Harris & Melstrom, 2015).

Die Allokation der Emissionsberechtigungen zu Beginn einer Handelsperiode beeinflusst maßgeblich die anfängliche Preisbildung und die Verteilung der Kosten. Historisch gab es zwei Hauptmethoden: die kostenlose Zuteilung (Grandfathering oder Benchmarking) und die Versteigerung (Goulder et al., 2009). Die Versteigerung wird oft als die effizienteste Methode angesehen, da sie Preisfindung durch Wettbewerb ermöglicht und staatliche Einnahmen generiert, die für Klimaschutzmaßnahmen oder zur Entlastung der Bevölkerung verwendet werden können (Shei et al., 2024). Sie minimiert auch das Risiko von Windfall-Profits, bei denen Unternehmen kostenlose Berechtigungen erhalten und die Kosten dennoch an die Verbraucher weitergeben (Gulli, 2016). Die kostenlose Zuteilung hingegen wird häufig aus Gründen der Wettbewerbsfähigkeit und zur Vermeidung von Carbon Leakage eingesetzt,



insbesondere in Sektoren, die internationalem Wettbewerb ausgesetzt sind (Wettestad, 2023). Hierbei erhalten Unternehmen Berechtigungen basierend auf historischen Emissionen oder branchenspezifischen Benchmarks. Obwohl dies die Akzeptanz des Systems erhöhen kann, kann es auch zu Verzerrungen führen, wenn die Benchmarks nicht regelmäßig aktualisiert werden oder wenn neue Marktteilnehmer benachteiligt werden.

Ein zentrales Merkmal der CO<sub>2</sub>-Märkte ist die Volatilität des CO<sub>2</sub>-Preises (Kifory, 2025). Der Preis kann durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst werden, darunter die allgemeine Wirtschaftslage (Rezessionen führen oft zu geringerer Nachfrage nach Berechtigungen), Änderungen in der Energiepolitik (z.B. Förderung erneuerbarer Energien reduziert den Bedarf an fossilen Brennstoffen), Wetterbedingungen (kalte Winter erhöhen den Energieverbrauch), und spekulative Handelsaktivitäten (Ladaniwskyj, 2008). Eine hohe Preisvolatilität kann die Planbarkeit für Unternehmen erschweren und Investitionen in emissionsarme Technologien hemmen, da die langfristige Rentabilität solcher Investitionen schwer abzuschätzen ist. Um dieser Volatilität entgegenzuwirken und eine gewisse Preisstabilität zu gewährleisten, wurden in einigen Systemen Mechanismen zur Preisstabilisierung implementiert.

Ein prominentes Beispiel hierfür ist die Marktstabilitätsreserve (MSR) im EU ETS (Mauer et al., 2020). Die MSR wurde eingeführt, um auf Über- oder Unterangebote von Emissionsberechtigungen zu reagieren, indem sie automatisch Berechtigungen in die Reserve verschiebt oder aus ihr entnimmt, abhängig von der Menge der im Umlauf befindlichen Berechtigungen. Dies soll dazu beitragen, den Markt ins Gleichgewicht zu bringen und extreme Preisschwankungen abzufedern, wodurch ein stabileres Preissignal für Investitionen geschaffen wird (Will, 2019). Ähnliche Mechanismen wie Preis- und Mengenkorridore (price and quantity collars) oder Reservepreise bei Auktionen werden in anderen Systemen, wie dem kalifornischen Cap-and-Trade-Programm, eingesetzt, um sowohl eine Mindestpreisuntergrenze (price floor) als auch eine Höchstpreisobergrenze (price ceiling) zu definieren und so die Unsicherheit für Marktteilnehmer zu reduzieren (Holt & Shobe, 2015).

Der CO<sub>2</sub>-Preis hat weitreichende Auswirkungen auf Investitionsentscheidungen und Innovationen. Ein glaubwürdiger und ausreichend hoher CO<sub>2</sub>-Preis signalisiert Unternehmen, dass die Emission von Treibhausgasen einen realen Kostenfaktor darstellt. Dies schafft einen Anreiz, in Energieeffizienzmaßnahmen, den Umstieg auf erneuerbare Energien, die Entwicklung neuer kohlenstoffarmer Technologien und die Verbesserung von Produktionsprozessen zu investieren (Weber & Neuhoﬀ, 2010). Forschung zeigt, dass der CO<sub>2</sub>-Preis als Katalysator für grüne Innovationen wirken kann, indem er die relative Attraktivität emissionsarmer Alternativen erhöht (Hu et al., 2025). Ohne einen solchen Preis würden die externen Kosten von Emissionen nicht internalisiert, und Unternehmen hätten weniger Anreize, von ihren etablierten, emissionsintensiven Praktiken abzuweichen.

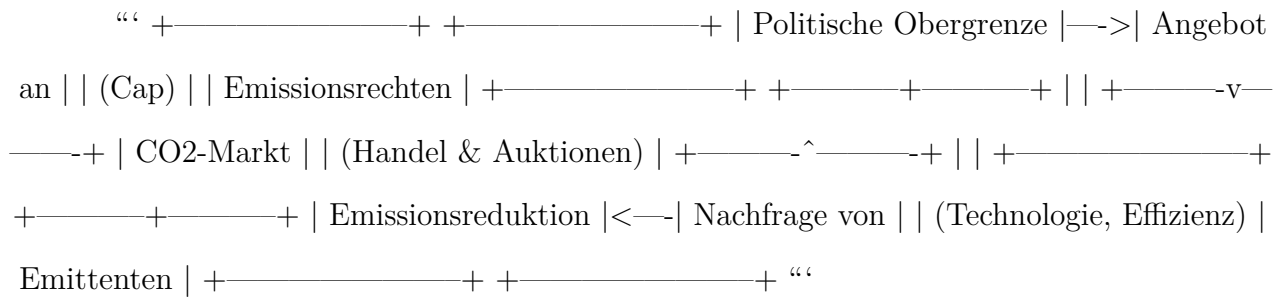
Ein weiteres wichtiges Konzept im Zusammenhang mit der Preisgestaltung und den Marktmechanismen ist das Carbon Leakage (Wettestad, 2023). Carbon Leakage tritt auf, wenn Unternehmen ihre Produktion in Länder mit weniger strengen Klimaschutzauﬂagen verlagern, um CO<sub>2</sub>-Kosten zu vermeiden. Dies würde nicht nur die Effektivität des heimischen CO<sub>2</sub>-Handelssystems untergraben, sondern auch zu einer globalen Erhöhung der Emissionen führen, da die Produktion in weniger eﬃzienten Anlagen stattﬁndet. Um Carbon Leakage zu begegnen, wurden verschiedene Maßnahmen ergriffen, darunter die kostenlose Zuteilung von Berechtigungen an gefährdete Sektoren und, jüngst, der Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) der EU (Wettestad, 2023). CBAM zielt darauf ab, einen CO<sub>2</sub>-Preis auf importierte Güter aus bestimmten Sektoren zu erheben, um gleiche Wettbewerbsbedingungen zu schaffen und zu verhindern, dass europäische Unternehmen aufgrund höherer heimischer CO<sub>2</sub>-Kosten benachteiligt werden.

Die Rolle von Derivaten und Finanzmärkten ist ebenfalls nicht zu unterschätzen. Emissionsberechtigungen können wie andere Rohstoffe gehandelt werden, und es haben sich komplexe Finanzmärkte für CO<sub>2</sub>-Derivate entwickelt. Diese Märkte ermöglichen es Unternehmen, Risiken abzusichern, die mit zukünftigen CO<sub>2</sub>-Preisschwankungen verbunden sind, und bieten Spekulanten die Möglichkeit, auf Preisentwicklungen zu wetten. Während

Derivatmärkte die Liquidität und Effizienz des Handels erhöhen können, bergen sie auch Risiken, wie die Möglichkeit von Preisschwankungen durch spekulative Blasen oder Marktmanipulation, die die Stabilität des CO2-Preises beeinträchtigen könnten (Andia, 2024). Eine effektive Regulierung und Überwachung dieser Finanzmärkte ist daher entscheidend, um ihre positiven Funktionen zu nutzen und negative Auswirkungen zu minimieren.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Preisgestaltung und die Marktmechanismen die zentralen Treiber der Emissionsreduktion in CO2-Handelssystemen sind. Ein gut funktionierender Markt mit einem robusten und berechenbaren CO2-Preis sendet klare Signale an Unternehmen, fördert Investitionen in Klimaschutz und treibt Innovationen voran. Die Herausforderung besteht darin, ein Gleichgewicht zwischen Ambition, wirtschaftlicher Belastbarkeit und politischer Akzeptanz zu finden, um die langfristige Wirksamkeit dieser entscheidenden Klimaschutzinstrumente zu gewährleisten. Die kontinuierliche Anpassung und Verfeinerung der Marktmechanismen, wie die Einführung der MSR oder des CBAM, zeigt die dynamische Entwicklung und das Bestreben, die Effektivität dieser Systeme zu maximieren.

### Abbildung 2: Dynamik des CO2-Preises im Emissionshandel



*Hinweis: Diese Abbildung illustriert das Zusammenspiel von Angebot (durch das Cap bestimmt) und Nachfrage (durch den Reduktionsbedarf der Emittenten bestimmt), die gemeinsam den CO2-Preis auf dem Emissionsmarkt bilden. Der CO2-Preis wiederum treibt Investitionen in Emissionsreduktionstechnologien und -maßnahmen an.*

### 3. Fallstudien: EU ETS, Kalifornien und China

Die Analyse konkreter Fallstudien ist unerlässlich, um die theoretischen Konzepte von CO<sub>2</sub>-Handelssystemen mit praktischen Erfahrungen zu untermauern und ihre Wirksamkeit unter realen Bedingungen zu bewerten. Das Europäische Emissionshandelssystem (EU ETS), das kalifornische Cap-and-Trade-Programm und das chinesische Nationale ETS repräsentieren unterschiedliche Entwicklungsstadien, geografische Kontexte und Designmerkmale, bieten aber gemeinsam wertvolle Einblicke in die Herausforderungen und Erfolge solcher Instrumente.

#### *3.1. Das Europäische Emissionshandelssystem (EU ETS)*

Das EU ETS ist das größte und älteste CO<sub>2</sub>-Handelssystem der Welt und ein Eckpfeiler der Klimapolitik der Europäischen Union (Edwin & Josephine, 2023)(Will, 2019). Es wurde 2005 ins Leben gerufen und deckt derzeit etwa 40 % der gesamten Treibhausgasemissionen der EU ab, einschließlich Emissionen aus der Stromerzeugung, energieintensiven Industrien (Stahl, Zement, Chemie, Raffinerien) und seit 2012 auch dem inner-europäischen Luftverkehr (Edwin & Josephine, 2023). Die Geschichte des EU ETS ist in mehrere Handelsperioden unterteilt, die jeweils unterschiedliche Designmerkmale und Herausforderungen aufwiesen.

In den frühen Phasen (Phase I: 2005-2007; Phase II: 2008-2012) war die kostenlose Zuteilung von Emissionsberechtigungen dominant, und es gab keine EU-weite Obergrenze, sondern nationale Pläne (Ladaniwskyj, 2008). Dies führte zu einem erheblichen Überangebot an Zertifikaten und einem sehr niedrigen, oft volatilen CO<sub>2</sub>-Preis, der kaum Anreize für substanzielle Emissionsreduktionen bot (Ladaniwskyj, 2008). Unternehmen profitierten teilweise von sogenannten Windfall-Profits, indem sie kostenlose Zertifikate erhielten und die theoretischen Kosten dennoch an die Verbraucher weitergaben (Gullì, 2016). Diese frühen Erfahrungen, obwohl kritisiert, lieferten wichtige Lernkurven für die Weiterentwicklung des Systems.

Mit Phase III (2013-2020) wurden wesentliche Reformen eingeführt (Will, 2019). Es wurde ein EU-weites Cap festgelegt, das jährlich linear gesenkt wird, und die Versteigerung von Zertifikaten wurde zur primären Allokationsmethode, insbesondere für den Stromsektor. Trotz dieser Verbesserungen blieb ein erheblicher Überschuss an Zertifikaten bestehen, der hauptsächlich auf die Wirtschaftskrise von 2008 und einen unerwartet hohen Einsatz erneuerbarer Energien zurückzuführen war. Um diesem Problem entgegenzuwirken und den CO<sub>2</sub>-Preis zu stabilisieren, wurde die Marktstabilitätsreserve (MSR) eingeführt, die seit 2019 in Betrieb ist (Mauer et al., 2020). Die MSR entnimmt automatisch einen Teil des Überschusses an Zertifikaten aus dem Markt und speichert ihn in einer Reserve, um bei Bedarf wieder in den Markt zurückgeführt zu werden. Dies hat maßgeblich dazu beigetragen, den CO<sub>2</sub>-Preis zu erhöhen und zu stabilisieren, was wiederum die Anreizwirkung für Emissionsreduktionen verstärkt hat (Dittmann et al., 2024).

Phase IV (2021-2030) verstärkt die Ambitionen weiter, mit einem noch steileren Reduktionspfad für das Cap und einer Ausweitung der MSR. Zudem wurde der Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) als neues Instrument zur Bekämpfung von Carbon Leakage eingeführt (Wettestad, 2023). CBAM verlangt von Importeuren, den CO<sub>2</sub>-Preis für bestimmte energieintensive Güter zu zahlen, die in die EU eingeführt werden, wodurch gleiche Wettbewerbsbedingungen für europäische und nicht-europäische Unternehmen geschaffen werden sollen (Wettestad, 2023).

Empirische Belege zeigen, dass das EU ETS in seinen späteren Phasen zu signifikanten Emissionsreduktionen geführt hat (Li & Zhao, 2025). Studien haben gezeigt, dass das System Unternehmen dazu anregt, in energieeffizientere Technologien zu investieren und ihre Produktionsprozesse zu dekarbonisieren (Bel & Joseph, 2014). Die Gesamtemissionen der vom EU ETS erfassten Sektoren sind seit seiner Einführung deutlich gesunken, wobei ein erheblicher Teil dieser Reduktionen dem System selbst zugeschrieben werden kann, insbesondere nach den Reformen, die den CO<sub>2</sub>-Preis gestärkt haben (Yan, 2021). Die Herausforderungen bleiben jedoch bestehen, darunter die Notwendigkeit, das System an neue

Klimaziele anzupassen, die Abgrenzung zu anderen Politikinstrumenten und die Sicherstellung einer gerechten Lastenverteilung.

### *3.2. Das kalifornische Cap-and-Trade-Programm*

Das kalifornische Cap-and-Trade-Programm, eingeführt im Jahr 2013, ist ein weiteres prominentes Beispiel für ein erfolgreiches Emissionshandelssystem (Asante, 2024). Es ist Teil eines umfassenderen Klimaschutzpakets im Bundesstaat Kalifornien und deckt rund 85 % der Gesamtemissionen des Bundesstaates ab, einschließlich der Sektoren Stromerzeugung, Industrie und Verkehr (über Treibstofflieferanten) (Asante, 2024). Ein bemerkenswertes Merkmal des kalifornischen Systems ist seine Verknüpfung (linkage) mit dem Cap-and-Trade-Programm der kanadischen Provinz Québec, was den Markt vergrößert und die Effizienz des Handels erhöht (Gao, 2024).

Das Design des kalifornischen Systems beinhaltet ein Cap, das schrittweise gesenkt wird, um die staatlichen Emissionsreduktionsziele zu erreichen. Die Allokation erfolgt sowohl durch Auktionen als auch durch kostenlose Zuteilung für bestimmte Sektoren, die als besonders anfällig für Carbon Leakage gelten. Um Preisstabilität zu gewährleisten und übermäßige Volatilität zu vermeiden, verfügt das kalifornische Programm über einen Reservepreis bei Auktionen (price floor) und einen Auktionsreserve-Verkaufsmechanismus (price ceiling) (Holt & Shobe, 2015). Diese Mechanismen sollen sicherstellen, dass der CO<sub>2</sub>-Preis weder zu niedrig ist, um Anreize zu schaffen, noch zu hoch, um die Wirtschaft übermäßig zu belasten.

Die Erfahrungen mit dem kalifornischen System sind weitgehend positiv. Es hat zu messbaren Emissionsreduktionen im Bundesstaat beigetragen und gleichzeitig das Wirtschaftswachstum nicht wesentlich beeinträchtigt (Casey et al., 2020). Die Verknüpfung mit Québec hat die Liquidität des Marktes erhöht und die Kosteneffizienz verbessert. Das System wird oft als Modell für regionale Emissionshandelssysteme angeführt, da es gezeigt hat, dass auch subnationale Jurisdiktionen effektive marktwirtschaftliche Klimaschutzinstrumente implementieren können (Asante, 2024). Herausforderungen umfassen die Notwendigkeit,

die langfristige Stabilität des Systems zu gewährleisten, die Anpassung an sich ändernde politische Rahmenbedingungen und die Integration mit anderen bundesstaatlichen und föderalen Klimaschutzmaßnahmen.

### *3.3. Das chinesische Nationale ETS*

China, als weltweit größter Emittent von Treibhausgasen, hat im Jahr 2021 sein nationales Emissionshandelssystem gestartet, nach einer mehrjährigen Pilotphase mit regionalen Systemen (Wei & Tian, 2013). Dies stellt einen entscheidenden Schritt in Chinas Klimapolitik dar und hat das Potenzial, die globalen Anstrengungen zur Emissionsreduktion erheblich zu beeinflussen (Gao, 2024). Das chinesische ETS ist das größte der Welt in Bezug auf die abgedeckten Emissionen und deckt zunächst nur den Stromsektor ab, der für etwa 40 % der gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen des Landes verantwortlich ist (Gao, 2024).

Das Design des chinesischen Systems unterscheidet sich in einigen Aspekten von den etablierten Systemen in Europa und Kalifornien. Die Allokation der Emissionsberechtigungen erfolgt derzeit hauptsächlich kostenlos, basierend auf Benchmarks für die Emissionsintensität der Stromerzeugung. Dies soll sicherstellen, dass die Kosten für die Unternehmen nicht übermäßig steigen und die Wettbewerbsfähigkeit erhalten bleibt. Die Implementierung des Systems ist komplex, da China eine riesige Anzahl von Unternehmen und eine vielfältige Wirtschaftsstruktur aufweist. Herausforderungen umfassen die Entwicklung robuster Monitoring-, Reporting- und Verifikationssysteme (MRV), die für die Glaubwürdigkeit und Effektivität des Systems unerlässlich sind (Ledo et al., 2023). Die Qualität der Emissionsdaten und die Durchsetzung der Compliance sind entscheidend für den Erfolg.

Die ersten Jahre des chinesischen ETS sind noch von der Etablierung der grundlegenden Mechanismen und der Schaffung von Kapazitäten geprägt. Der CO<sub>2</sub>-Preis ist im Vergleich zu den europäischen und kalifornischen Systemen noch relativ niedrig, was die Anreizwirkung für weitreichende Dekarbonisierungsmaßnahmen begrenzt (Gao, 2024). Es wird erwartet, dass das System im Laufe der Zeit weiterentwickelt und auf andere Sektoren ausgeweitet

wird, um seine Ambitionen zu erhöhen und einen stärkeren Beitrag zu Chinas Klimazielen zu leisten. Das chinesische ETS ist ein wichtiges Experiment, das zeigen wird, wie ein großes Schwellenland ein marktbasiertes Instrument zur Emissionsreduktion implementieren kann und welche Lehren daraus für andere Regionen gezogen werden können.

Zusammenfassend zeigen die Fallstudien, dass CO<sub>2</sub>-Handelssysteme wirksame Instrumente zur Emissionsreduktion sein können, wenn sie gut konzipiert, ambitioniert und durch robuste Marktmechanismen gestützt werden. Die Erfahrungen des EU ETS und Kaliforniens demonstrieren die Notwendigkeit einer kontinuierlichen Anpassung und Verfeinerung, um auf Marktgegebenheiten und politische Ziele zu reagieren. Chinas ETS befindet sich noch in einer frühen Phase, birgt jedoch enormes Potenzial für die globale Klimapolitik.

**Tabelle 2: Vergleich ausgewählter Emissionshandelssysteme (ETS)**

Merkmal	EU ETS (Phase IV)	Kalifornisches Cap-and-Trade	Chinesisches Nationales ETS
Startjahr	2005	2013	2021
Abgedeckte Emissionen	~40% EU-THG	~85% Kalifornien-THG	~40% China-THG (nur Strom)
Sektorenabdeckung	Strom, Industrie, Luftfahrt	Strom, Industrie, Verkehr	Stromsektor
Allokation	Auktionierung & Kostenlos	Auktionierung & Kostenlos	Hauptsächlich Kostenlos
Marktstabilität	MSR	Preis-Floor, Reserve-Auktion	Aktuell begrenzt
Verknüpfung	Schweiz	Québec	Aktuell keine
Ambitionsniveau	Hoch (55% Red. bis 2030)	Hoch (40% Red. bis 2030)	Mittel (Ausbau geplant)



*Hinweis: Diese Tabelle bietet einen Überblick über die wichtigsten Designmerkmale und das Ambitionsniveau der drei untersuchten Emissionshandelssysteme. Die Daten sind vereinfacht und können sich ändern.*

## 4. Vergleich mit anderen Klimaschutzinstrumenten

CO<sub>2</sub>-Preissysteme, insbesondere Cap-and-Trade-Systeme, sind nur eines von mehreren Instrumenten im Werkzeugkasten der Klimapolitik. Ein umfassender Vergleich mit anderen Ansätzen ist entscheidend, um ihre relativen Stärken und Schwächen zu verstehen und die optimale Kombination von Maßnahmen für spezifische Kontexte zu identifizieren (Kirchner et al., 2019). Zu den wichtigsten alternativen und komplementären Instrumenten gehören CO<sub>2</sub>-Steuern, Regulierungen und Standards, Subventionen sowie freiwillige Vereinbarungen.

### 4.1. CO<sub>2</sub>-Steuern

CO<sub>2</sub>-Steuern stellen einen direkten Preismechanismus dar, bei dem eine feste Abgabe pro Tonne emittiertem CO<sub>2</sub> erhoben wird (Piga, 2003). Im Gegensatz zu einem Cap-and-Trade-System, das eine feste Mengengrenzung (Cap) vorsieht und den Preis variabel lässt, fixiert eine CO<sub>2</sub>-Steuer den Preis und lässt die Emissionsmenge variabel (Rivers & Wigle, 2018).

**Vorteile von CO<sub>2</sub>-Steuern:** \* **Preissicherheit:** Unternehmen wissen genau, welche Kosten pro Tonne Emission auf sie zukommen, was die Planbarkeit von Investitionen in emissionsarme Technologien erleichtert. Diese Preissicherheit kann besonders für langfristige Investitionsentscheidungen vorteilhaft sein (Holt & Shobe, 2015). \* **Einfachheit:** CO<sub>2</sub>-Steuern sind oft einfacher zu implementieren und zu verwalten als komplexe Handelssysteme, da sie keine aufwendigen Allokationsmechanismen oder den Aufbau eines Handelsmarktes erfordern (Rivers & Wigle, 2018). \* **Stabile Einnahmen:** Eine CO<sub>2</sub>-Steuer generiert stabile Einnahmen für den Staat, die für die Finanzierung von Klimaschutzmaßnahmen, zur Senkung

anderer Steuern (z.B. Einkommenssteuer) oder zur Entlastung der Bevölkerung verwendet werden können (Shei et al., 2024).

**Nachteile von CO2-Steuern:**

- \* **Unsichere Emissionsreduktionen:** Da die Emissionsmenge variabel ist, gibt es keine Garantie, dass ein bestimmtes Reduktionsziel erreicht wird. Die Reduktion hängt von der Preiselastizität der Nachfrage ab (Rivers & Wigle, 2018). Wenn der gewählte Steuersatz zu niedrig ist, um signifikante Verhaltensänderungen zu bewirken, bleiben die Emissionen hoch.
- \* **Politische Akzeptanz:** Die Einführung neuer Steuern ist oft politisch unpopulär und kann auf Widerstand stoßen, insbesondere wenn die Einnahmen nicht transparent und nachvollziehbar für die Bevölkerung eingesetzt werden.
- \* **Wettbewerbsverzerrungen:** Ähnlich wie bei CO2-Handelssystemen können CO2-Steuern Bedenken hinsichtlich der Wettbewerbsfähigkeit und des Carbon Leakage hervorrufen, wenn sie in einem Land ohne entsprechende Maßnahmen in anderen Ländern eingeführt werden.

**Vergleich mit ETS:** Während CO2-Steuern Preissicherheit bieten, garantieren ETS-Systeme Mengenbegrenzung. Die Wahl zwischen beiden hängt oft von der politischen Präferenz ab, entweder ein klares Emissionsziel zu erreichen (ETS) oder eine feste Kostenbelastung zu gewährleisten (Steuer). In der Praxis werden beide Instrumente oft ergänzend eingesetzt.

#### *4.2. Regulierungen und Standards*

Regulierungen und Standards sind Command-and-Control-Instrumente, die spezifische Verhaltensweisen oder technologische Anforderungen vorschreiben. Beispiele hierfür sind Emissionsgrenzwerte für Fahrzeuge oder Industrieanlagen, Energieeffizienzstandards für Gebäude und Geräte oder Vorschriften zur Nutzung erneuerbarer Energien.

**Vorteile:**

- \* **Direkte Wirkung:** Regulierungen können sehr direkt und schnell zu Emissionsreduktionen führen, insbesondere wenn sie klare und durchsetzbare Vorgaben machen.
- \* **Sicherheit:** Sie bieten eine hohe Sicherheit, dass bestimmte Ziele erreicht werden, da sie nicht von Marktmechanismen abhängen.
- \* **Geringe Transaktionskosten:** Für die

Unternehmen können die Compliance-Kosten für die Einhaltung klarer Standards oft geringer sein als die Navigation in einem komplexen Handelssystem.

**Nachteile:** \* **Inflexibilität und Ineffizienz:** Regulierungen sind oft unflexibel und können die Reduktion nicht zu den geringsten Kosten erreichen. Sie schreiben oft eine “one-size-fits-all”-Lösung vor, die nicht für alle Unternehmen oder Situationen optimal ist. Dies kann zu höheren Gesamtkosten für die Wirtschaft führen (Kirchner et al., 2019). \* **Hemmung von Innovationen:** Indem sie spezifische Technologien vorschreiben, können Regulierungen die Entwicklung und Einführung innovativerer und kostengünstigerer Reduktionslösungen behindern. \* **Administrativer Aufwand:** Die Festlegung, Überwachung und Durchsetzung vieler detaillierter Standards kann einen erheblichen administrativen Aufwand für die Behörden bedeuten.

**Vergleich mit CO2-Preissystemen:** Während Regulierungen bestimmte Reduktionen sicherstellen, sind CO2-Preissysteme flexibler und kosteneffizienter, da sie Unternehmen die Wahl der Reduktionsstrategie überlassen. Oft werden Regulierungen als Basislinie genutzt, auf der CO2-Preissysteme aufbauen, um zusätzliche Anreize zu schaffen (Kirchner et al., 2019).

#### *4.3. Subventionen und Anreize*

Subventionen und Anreize fördern klimafreundliche Technologien und Verhaltensweisen durch finanzielle Unterstützung. Dazu gehören Investitionszuschüsse für erneuerbare Energien, Steuererleichterungen für Elektrofahrzeuge oder Forschungsgelder für grüne Technologien.

**Vorteile:** \* **Förderung neuer Technologien:** Subventionen können dazu beitragen, neue Technologien auf den Markt zu bringen und ihre Skalierung zu beschleunigen, indem sie die anfänglichen Kosten senken und Investitionsrisiken minimieren. \* **Positive Anreize:** Sie schaffen positive Anreize für Unternehmen und Verbraucher, ohne direkte Kosten aufzuerlegen, was die politische Akzeptanz erhöhen kann. \* **Gezielte Förderung:** Subventionen können

gezielt eingesetzt werden, um spezifische Sektoren oder Technologien zu fördern, die als besonders vielversprechend für den Klimaschutz gelten.

**Nachteile:** \* **Kosten für den Steuerzahler:** Subventionen sind mit erheblichen Kosten für den Steuerzahler verbunden und können zu Ineffizienzen führen, wenn sie nicht gut konzipiert sind (z.B. Mitnahmeeffekte). \* **Marktverzerrungen:** Sie können den Wettbewerb verzerren, indem sie bestimmte Technologien gegenüber anderen bevorzugen, auch wenn letztere möglicherweise kostengünstiger wären. \* **Abhängigkeit:** Eine zu starke Abhängigkeit von Subventionen kann die Entwicklung einer eigenständigen Wettbewerbsfähigkeit der geförderten Technologien hemmen.

**Vergleich mit CO2-Preissystemen:** Subventionen wirken komplementär zu CO2-Preissystemen. Während CO2-Preise die Kosten für Emissionen internalisieren, können Subventionen genutzt werden, um die Entwicklung und Einführung von emissionsarmen Alternativen zu beschleunigen, insbesondere in frühen Phasen der Technologieentwicklung. Ein effektiver Policy Mix kombiniert oft beides (Kirchner et al., 2019).

#### *4.4. Freiwillige Vereinbarungen und Informationskampagnen*

Freiwillige Vereinbarungen basieren auf Selbstverpflichtungen von Unternehmen oder Branchen zur Reduzierung ihrer Emissionen, oft in Zusammenarbeit mit der Regierung. Informationskampagnen zielen darauf ab, das Bewusstsein für Klimaschutz zu schärfen und Verhaltensänderungen bei Verbrauchern zu fördern.

**Vorteile:** \* **Flexibilität:** Freiwillige Vereinbarungen bieten Unternehmen hohe Flexibilität bei der Wahl ihrer Reduktionsstrategien. \* **Geringe Verwaltungskosten:** Sie sind oft mit geringeren Verwaltungskosten für die Regierung verbunden. \* **Erhöhte Akzeptanz:** Da sie auf Freiwilligkeit basieren, können sie eine höhere Akzeptanz bei den beteiligten Akteuren finden.

**Nachteile:** \* **Geringe Wirksamkeit:** Ihre Wirksamkeit ist oft begrenzt, da es keine rechtlich bindenden Verpflichtungen gibt und das Risiko von Trittbrettfahrer-Verhalten besteht.

\* **Messprobleme:** Die Überprüfung und Messung der tatsächlichen Emissionsreduktionen kann schwierig sein (Ledo et al., 2023). \* **Langsame Wirkung:** Verhaltensänderungen durch Informationskampagnen sind oft langsam und schwer zu quantifizieren.

**Vergleich mit CO2-Preissystemen:** Freiwillige Ansätze und Informationskampagnen sind in der Regel weniger wirksam als Preisinstrumente oder Regulierungen, da sie keine direkten finanziellen Anreize oder rechtlichen Verpflichtungen schaffen. Sie können jedoch eine wichtige Rolle bei der Sensibilisierung und der Unterstützung anderer, stringenterer Politikmaßnahmen spielen.

#### *4.5. Der Policy Mix*

In der Realität wird Klimapolitik selten mit einem einzigen Instrument betrieben. Stattdessen wird ein „Policy Mix“ aus verschiedenen Instrumenten eingesetzt, um die jeweiligen Stärken zu nutzen und Schwächen zu kompensieren (Kirchner et al., 2019). CO2-Preissysteme können als übergeordnetes Steuerungsinstrument dienen, das durch gezielte Regulierungen (z.B. für Sektoren, die nicht vom ETS abgedeckt sind), Subventionen (für Forschung und Entwicklung neuer Technologien) und Informationskampagnen ergänzt wird. Die Herausforderung besteht darin, einen kohärenten und effizienten Policy Mix zu gestalten, der Überschneidungen und widersprüchliche Anreize vermeidet, aber gleichzeitig die gewünschten Reduktionsziele erreicht (Kirchner et al., 2019). Die Erfahrungen zeigen, dass ein gut abgestimmter Policy Mix effektiver ist als die alleinige Anwendung eines Instruments, da er verschiedene Marktversagen adressieren und die Transformation zu einer kohlenstoffarmen Wirtschaft auf mehreren Ebenen unterstützen kann.

#### **Tabelle 3: Stärken und Schwächen verschiedener Klimaschutzinstrumente**

Instrument	Stärken	Schwächen	Rolle im Policy Mix
<b>Emissionshandel (ETS)</b>	Kosteneffizienz, Mengen-Sicherheit, Innovation	Preisvolatilität, Carbon Leakage, Komplexität	Kerninstrument, Preissignal
<b>CO2-Steuer</b>	Preissicherheit, Einnahmen, Einfachheit	Mengen-Unsicherheit, Akzeptanzprobleme	Preissignal, fiskalische Einnahmen
<b>Regulierungen/Standards</b>	Standardisierung, Ziel-Sicherheit	Ineffizienz, Innovationshemmnis, Inflexibilität	Basislinie, spezifische Sektoren
<b>Subventionen/Anreize</b>	Technologieförderung, Akzeptanz, gezielt	Kosten, Marktverzerrungen, Mitnahmeeffekte	Technologie-Push, Markteinführung
<b>Freiwillige Vereinb.</b>	Flexibilität, geringe Verwaltungskosten	Geringe Wirksamkeit, Messprobleme, Trittbrettfahrer	Bewusstsein, ergänzend

*Hinweis: Diese Tabelle fasst die primären Stärken und Schwächen der wichtigsten Klimaschutzinstrumente zusammen und skizziert ihre typische Rolle in einem umfassenden Policy Mix.*

## 5. Empirische Belege für Klimaschutzwirkung

Die Wirksamkeit von CO2-Preissystemen, insbesondere von Emissionshandelssystemen, bei der Erzielung von Emissionsreduktionen ist Gegenstand umfangreicher empirischer Forschung. Diese Forschung ist entscheidend, um die theoretischen Vorteile dieser markt-basierten Instrumente in der Praxis zu validieren und ihre tatsächlichen Beiträge zum Klimaschutz zu quantifizieren.

### *5.1. Quantitative Studien zu Emissionsreduktionen*

Zahlreiche quantitative Studien haben die Auswirkungen von CO<sub>2</sub>-Preissystemen auf die Treibhausgasemissionen untersucht. Ein Großteil dieser Forschung konzentriert sich auf das EU ETS aufgrund seiner langen Geschichte und der Verfügbarkeit umfassender Daten (Will, 2019). Studien haben wiederholt gezeigt, dass das EU ETS, insbesondere nach den Reformen zur Stärkung des CO<sub>2</sub>-Preises, zu signifikanten Emissionsreduktionen geführt hat (Li & Zhao, 2025)(Yan, 2021). Beispielsweise deuten Analysen darauf hin, dass das EU ETS in der Lage war, die Emissionen in den abgedeckten Sektoren um mehrere Prozentpunkte pro Jahr zu senken, verglichen mit einem Szenario ohne Emissionshandel (Bel & Joseph, 2014). Einige Schätzungen gehen davon aus, dass das EU ETS bis 2020 zu einer Reduktion von über einer Milliarde Tonnen CO<sub>2</sub> geführt hat (Edwin & Josephine, 2023).

Methodisch verwenden diese Studien oft ökonometrische Ansätze, wie Difference-in-Differences-Modelle oder Matching-Verfahren, um die kausalen Effekte des Emissionshandels von anderen Einflussfaktoren zu isolieren. Dabei werden die Emissionsentwicklungen von Unternehmen oder Sektoren, die dem ETS unterliegen, mit denen verglichen, die nicht unterliegen, oder mit historischen Trends vor der Einführung des Systems. Es wird auch berücksichtigt, dass technologische Fortschritte und andere politische Maßnahmen ebenfalls zur Emissionsminderung beitragen können (Bel & Joseph, 2014).

Auch für das kalifornische Cap-and-Trade-Programm gibt es starke empirische Belege für seine Wirksamkeit. Studien haben gezeigt, dass das Programm zu einer Reduktion der Treibhausgasemissionen im Bundesstaat Kalifornien beigetragen hat, während gleichzeitig ein robustes Wirtschaftswachstum aufrechterhalten wurde (Casey et al., 2020). Die Verknüpfung des kalifornischen Systems mit dem von Québec wurde ebenfalls positiv bewertet, da sie die Marktliquidität erhöht und die Kosteneffizienz der Reduktionen verbessert hat (Gao, 2024).

Für das chinesische Nationale ETS, das noch relativ jung ist, sind die empirischen Belege noch im Entstehen. Erste Analysen zeigen, dass das System das Potenzial hat, Emissionsreduktionen im Stromsektor zu bewirken, obwohl der CO<sub>2</sub>-Preis in den Anfangsjahren

noch nicht so hoch war, um weitreichende strukturelle Veränderungen auszulösen (Gao, 2024). Die Herausforderung für China liegt in der Verbesserung der MRV-Systeme und der schrittweisen Erhöhung der Ambitionen des Caps, um die volle Wirkung des Systems zu entfalten (Ledo et al., 2023).

Ein wichtiger Aspekt der quantitativen Forschung ist auch die Analyse der Kostenwirksamkeit. Studien haben gezeigt, dass Cap-and-Trade-Systeme potenziell kosteneffizienter sein können als Command-and-Control-Regulierungen, da sie den Unternehmen die Flexibilität geben, Reduktionen dort vorzunehmen, wo sie am günstigsten sind (Kirchner et al., 2019). Dies führt zu geringeren Gesamtkosten für die Wirtschaft, um ein bestimmtes Emissionsziel zu erreichen.

## *5.2. Qualitative Studien zu Verhaltensänderungen und Innovationen*

Neben der quantitativen Messung von Emissionsreduktionen untersuchen qualitative Studien die tiefergehenden Auswirkungen von CO<sub>2</sub>-Preissystemen auf das Verhalten von Unternehmen und die Förderung von Innovationen. Diese Studien basieren oft auf Interviews, Fallstudien und der Analyse von Unternehmensstrategien.

Es gibt Belege dafür, dass CO<sub>2</sub>-Preissysteme Unternehmen dazu anregen, ihre Energieeffizienz zu verbessern und in emissionsarme Technologien zu investieren (Weber & Neuhoff, 2010). Der interne CO<sub>2</sub>-Preis, den Unternehmen aufgrund des externen Preissignals entwickeln, wird zu einem Faktor bei Investitionsentscheidungen und der Produktentwicklung (Hu et al., 2025). Dies führt nicht nur zu einer direkten Reduktion von Emissionen, sondern auch zu einer Beschleunigung des technologischen Wandels in Richtung einer kohlenstoffarmen Wirtschaft. Unternehmen suchen aktiv nach Wegen, um ihre CO<sub>2</sub>-Bilanz zu verbessern, was die Entwicklung und Vermarktung neuer grüner Technologien fördert.

Allerdings zeigen qualitative Studien auch, dass die Reaktion von Unternehmen auf den CO<sub>2</sub>-Preis von verschiedenen Faktoren abhängt, darunter die Höhe und Stabilität des Preises, die Verfügbarkeit von Reduktionsoptionen, die Unternehmensgröße und die Branchenstruktur



(Pearse & Böhm, 2014). Kleine und mittlere Unternehmen (KMU) könnten beispielsweise Schwierigkeiten haben, die notwendigen Investitionen zu tätigen oder die Komplexität des Handelssystems zu verstehen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Wirkung von CO<sub>2</sub>-Preissystemen auf die Konsumenten. Obwohl der CO<sub>2</sub>-Preis in der Regel auf Unternehmensebene erhoben wird, können die Kosten an die Verbraucher weitergegeben werden (Reinaud, 2008). Dies kann zu einer Änderung des Konsumverhaltens führen, indem Produkte und Dienstleistungen mit hohem CO<sub>2</sub>-Fußabdruck teurer werden und umweltfreundlichere Alternativen attraktiver erscheinen (Shei et al., 2024). Die empirische Evidenz hierzu ist jedoch gemischt und hängt stark von der Preiselastizität der Nachfrage und der Transparenz der Kostenweitergabe ab.

### *5.3. Diskussion von Limitationen empirischer Studien*

Trotz der zunehmenden Evidenzbasis gibt es wichtige Limitationen in der empirischen Forschung zur Klimaschutzwirkung von CO<sub>2</sub>-Preissystemen.

- **Kausalitätsproblem:** Es ist oft schwierig, die kausalen Effekte des Emissionshandels von anderen gleichzeitig wirkenden Faktoren zu isolieren. Wirtschaftliche Rezessionen, technologische Fortschritte und andere Klimaschutzmaßnahmen (z.B. Förderung erneuerbarer Energien) können ebenfalls zu Emissionsreduktionen führen, was die genaue Zuschreibung der Effekte erschwert (Bel & Joseph, 2014).
- **Datenverfügbarkeit und -qualität:** Die Verfügbarkeit von hochqualitativen und konsistenten Emissionsdaten ist entscheidend, aber nicht immer gegeben, insbesondere in Entwicklungsländern oder für kleinere Systeme (Ledo et al., 2023).
- **Langfristige Effekte:** Viele Studien konzentrieren sich auf kurz- bis mittelfristige Effekte. Die langfristigen Auswirkungen auf technologische Transformationen und strukturellen Wandel sind jedoch komplexer zu messen und erfordern längere Beobachtungszeiträume.

- **Carbon Leakage:** Die Messung von Carbon Leakage ist notorisch schwierig, da es schwierig ist, die Verlagerung von Emissionen über Ländergrenzen hinweg eindeutig zu verfolgen und kausal dem CO<sub>2</sub>-Preissystem zuzuordnen (Wettestad, 2023).
- **Systemdesign-Variationen:** CO<sub>2</sub>-Preissysteme unterscheiden sich erheblich in ihrem Design (Cap-Level, Allokation, Preisstabilisierungsmechanismen), was die Verallgemeinerbarkeit von Studienergebnissen erschwert. Eine erfolgreiche Implementierung in einem Kontext garantiert nicht den Erfolg in einem anderen.

#### *5.4. Zusammenfassung der Evidenzbasis*

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die empirische Evidenz überwiegend die Wirksamkeit von CO<sub>2</sub>-Preissystemen bei der Reduzierung von Treibhausgasemissionen bestätigt, insbesondere wenn sie gut konzipiert, ambitioniert und mit robusten Marktmechanismen ausgestattet sind (Li & Zhao, 2025). Das EU ETS und das kalifornische System dienen als prominente Beispiele dafür, wie solche Instrumente erfolgreich implementiert werden können, um Klimaziele zu erreichen. Sie fördern nicht nur direkte Emissionsreduktionen, sondern auch technologische Innovationen und eine Verschiebung hin zu einer kohlenstoffarmen Wirtschaft.

Die Herausforderungen liegen in der politischen Akzeptanz, der Vermeidung von Carbon Leakage, der Sicherstellung der Preisstabilität und der kontinuierlichen Anpassung der Systeme an neue wissenschaftliche Erkenntnisse und politische Ziele. Die Forschung zeigt auch, dass CO<sub>2</sub>-Preissysteme am effektivsten sind, wenn sie Teil eines umfassenden Policy Mixes sind, der auch Regulierungen, Subventionen und andere unterstützende Maßnahmen umfasst (Kirchner et al., 2019). Die kontinuierliche Überwachung und Bewertung dieser Systeme ist unerlässlich, um ihre Effektivität zu maximieren und ihre Rolle als zentrales Instrument im Kampf gegen den Klimawandel zu stärken. Die Erfahrungen aus etablierten Systemen bieten wertvolle Lehren für die Entwicklung und Verfeinerung neuer CO<sub>2</sub>-Preissysteme weltweit, einschließlich des aufstrebenden chinesischen ETS.

**Tabelle 4: Geschätzte ökonomische Auswirkungen von CO<sub>2</sub>-Preissystemen  
(Beispiel EU ETS)**

Indikator	Auswirkungen auf Unternehmen	Auswirkungen auf Haushalte	Auswirkungen auf Innovation
<b>Produktionskosten</b>	Steigen in emissionsintensiven Sektoren	Indirekte Kosten durch höhere Energiepreise	Anreiz zur Effizienzsteigerung
<b>Wettbewerbsfähigkeit</b>	Risiko von Carbon Leakage für bestimmte Sektoren	Geringer direkter Effekt	Förderung neuer grüner Technologien
<b>Investitionen</b>	Verlagerung hin zu emissionsarmen Prozessen	Reduzierte Kaufkraft (ohne Kompensation)	Beschleunigung von F&E in Dekarbonisierung
<b>Arbeitsplätze</b>	Struktureller Wandel, Jobverlagerungen	Geringer direkter Effekt	Schaffung neuer grüner Arbeitsplätze
<b>BIP-Wachstum</b>	Geringe bis moderate negative Effekte (kurzfr.)	Geringe bis moderate negative Effekte (kurzfr.)	Langfristig positive Impulse

*Hinweis: Diese Tabelle fasst die geschätzten ökonomischen Auswirkungen von CO<sub>2</sub>-Preissystemen basierend auf empirischer Evidenz, primär aus dem EU ETS, zusammen. Die Effekte sind komplex und hängen stark von der Systemgestaltung und den begleitenden Maßnahmen ab.*

## Diskussion

Die vorliegende Masterarbeit hat sich zum Ziel gesetzt, die Wirksamkeit und die Gestaltungsmerkmale von Emissionshandelssystemen (EHS) im Kontext des globalen Klimaschutzes

zu analysieren. Die gewonnenen Erkenntnisse aus der vorhergehenden Analysephase bieten eine fundierte Basis, um die Implikationen für die Klimapolitik zu diskutieren, bestehende Grenzen und Herausforderungen zu beleuchten, Verbesserungsvorschläge für CO<sub>2</sub>-Märkte zu formulieren, die Rolle des Emissionshandels im globalen Rahmen zu verorten und konkrete Empfehlungen für Politik und Wirtschaft abzuleiten. Diese Diskussion wird die Ergebnisse im Licht der aktuellen wissenschaftlichen Literatur interpretieren und dabei sowohl die Stärken als auch die Schwächen von EHS kritisch beleuchten, um einen konstruktiven Beitrag zur Weiterentwicklung effektiver Klimaschutzstrategien zu leisten.

## **1. Interpretation der Ergebnisse und ihre Implikationen für die Klimapolitik**

Die Analyse der Emissionshandelssysteme hat gezeigt, dass sie ein potenziell wirksames Instrument zur Reduktion von Treibhausgasemissionen darstellen, indem sie den Verursachern einen Preis für ihre Emissionen auferlegen und so Anreize für Emissionsminderungen schaffen (Digitomie & Ekemezie, 2024). Die grundlegende Idee der Pigou-Steuer, externe Kosten zu internalisieren (Piga, 2003), findet im Emissionshandel eine marktwirtschaftliche Umsetzung. Insbesondere das Europäische Emissionshandelssystem (EU-EHS) wird oft als Pionier und Referenzmodell für andere Regionen betrachtet (Edwin & Josephine, 2023)(Will, 2019). Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass ein gut konzipiertes EHS in der Lage ist, die Emissionen in den erfassten Sektoren signifikant zu senken, was durch die Erfahrungen in Europa und anderen etablierten Systemen wie dem kalifornischen Cap-and-Trade-Programm belegt wird (Asante, 2024).

Die Wirksamkeit eines EHS hängt jedoch maßgeblich von seiner Ausgestaltung ab, insbesondere von der Festlegung der Obergrenze (Cap), die die Gesamtmenge der zulässigen Emissionen bestimmt, und der Stabilität des Kohlenstoffpreises (Li & Zhao, 2025). Ein zu hohes Cap oder eine zu niedrige Preissensitivität können die Anreizwirkung mindern, während ein angemessenes Preissignal Innovationen und Investitionen in kohlenstoffarme

Technologien stimuliert (Weber & Neuhoff, 2010). Die Implikationen für die Klimapolitik sind weitreichend: EHS können als zentraler Pfeiler in einem umfassenden Policy-Mix dienen, der darauf abzielt, die nationalen und internationalen Klimaziele, wie sie beispielsweise im Pariser Abkommen verankert sind (Ramji, 2018), zu erreichen. Sie bieten eine kosteneffiziente Methode zur Emissionsreduktion, da sie es den Unternehmen ermöglichen, die günstigsten Minderungsoptionen zu wählen (Rivers & Wigle, 2018).

Darüber hinaus können EHS politische Flexibilität bieten, indem sie es ermöglichen, das Emissionsreduktionsziel festzulegen und den Markt die effizienteste Allokation der Reduktionslast finden zu lassen. Dies ist besonders relevant in Kontexten, in denen direkte Regulierungen oder Subventionen als weniger effizient oder politisch schwieriger umsetzbar erachtet werden. Die Integration von EHS in die bestehende Klimapolitik erfordert jedoch eine sorgfältige Abstimmung mit anderen Instrumenten, um Überschneidungen, widersprüchliche Anreize oder unerwünschte Nebeneffekte zu vermeiden (Kirchner et al., 2019). Beispielsweise können Subventionen für erneuerbare Energien in einem EHS-Kontext zu einem Überangebot an Zertifikaten und einem Preisverfall führen, wenn der Mechanismus zur Anpassung des Caps nicht ausreichend flexibel ist. Die Herausforderung besteht darin, eine kohärente und synergistische Politiklandschaft zu schaffen, in der verschiedene Instrumente einander ergänzen und verstärken, um die Dekarbonisierung der Wirtschaft voranzutreiben.

Die Ergebnisse unterstreichen auch die Bedeutung einer dynamischen Anpassung der EHS an sich ändernde wirtschaftliche und technologische Rahmenbedingungen. Die Fähigkeit, das Cap im Laufe der Zeit zu straffen und Marktstabilitätsmechanismen einzuführen, ist entscheidend, um die langfristige Glaubwürdigkeit und Wirksamkeit des Systems zu gewährleisten (Mauer et al., 2020). Ohne solche Anpassungen besteht die Gefahr, dass die Systeme ihre Wirksamkeit verlieren und nicht mehr ausreichen, um die ambitionierten Klimaziele zu erreichen. Die fortlaufende Überwachung und Bewertung der EHS-Leistung ist daher unerlässlich, um sicherzustellen, dass sie ihren Zweck erfüllen und einen substanziellen Beitrag zur globalen Emissionsminderung leisten. Dies erfordert robuste Monitoring-, Reporting-

und Verifikationssysteme (MRV), die Transparenz schaffen und die Integrität des Marktes gewährleisten (Ledo et al., 2023)(Di Vaio & Ali, 2024).

## 2. Grenzen und Herausforderungen des Emissionshandels

Trotz des Potenzials von Emissionshandelssystemen sind sie mit einer Reihe von inhärenten Grenzen und praktischen Herausforderungen konfrontiert, die ihre Wirksamkeit und Akzeptanz beeinträchtigen können. Eine der prominentesten Herausforderungen ist die **Preisvolatilität und Marktstabilität**. CO<sub>2</sub>-Preise können erheblichen Schwankungen unterliegen, beeinflusst durch wirtschaftliche Zyklen, politische Entscheidungen, Energiepreise und sogar Spekulation (Ladaniwskyj, 2008)(Dittmann et al., 2024)(Kifory, 2025). Diese Volatilität erschwert es Unternehmen, langfristige Investitionsentscheidungen in kohlenstoffarme Technologien zu treffen, da die Unsicherheit über zukünftige CO<sub>2</sub>-Kosten hoch ist. Ein instabiler Preis kann entweder zu einem zu schwachen Anreiz für Dekarbonisierung führen, wenn die Preise zu niedrig sind, oder zu unnötigen Belastungen für die Wirtschaft, wenn sie unvorhersehbar hoch schnellen. Mechanismen wie Preisbänder (price collars) oder Marktstabilitätsreserven (MSR) sind Versuche, diese Volatilität zu dämpfen und eine gewisse Planungssicherheit zu schaffen (Holt & Shobe, 2015).

Ein weiteres kritisches Problem ist das **Carbon Leakage** und die damit verbundene Frage der Wettbewerbsfähigkeit. Wenn CO<sub>2</sub>-Preise in einer Region deutlich höher sind als in anderen, könnten energieintensive Unternehmen ihre Produktion in Länder mit weniger strengen Emissionsvorschriften verlagern. Dies würde nicht nur die heimischen Arbeitsplätze gefährden, sondern auch die globalen Emissionen nicht reduzieren, sondern lediglich geografisch verschieben (Wettestad, 2023). Um diesem Risiko entgegenzuwirken, hat die Europäische Union beispielsweise den Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) vorgeschlagen, der Importe aus Ländern ohne äquivalente CO<sub>2</sub>-Bepreisung bepreisen soll. Solche Schutzmechanismen sind jedoch komplex in der Implementierung und können international zu Handelsspannungen führen. Die Vergabe kostenloser Zertifikate an gefährdete

Sektoren, eine weit verbreitete Praxis in vielen EHS, ist eine andere Strategie zur Minderung des Carbon Leakage, führt aber gleichzeitig zu **Windfall Profits** (Übergewinnen), insbesondere im Energiesektor (Gullì, 2016)(Reinaud, 2008). Wenn Unternehmen kostenlose Zertifikate erhalten, aber die CO<sub>2</sub>-Kosten auf die Verbraucher umlegen können, erzielen sie Gewinne, die nicht direkt mit Emissionsminderungen verbunden sind (Goulder et al., 2009). Dies untergräbt die Effizienz und die Gerechtigkeit des Systems und kann die öffentliche Akzeptanz beeinträchtigen.

Die **Allokationsprobleme** gehen über Windfall Profits hinaus. Die Bestimmung der anfänglichen Zuteilung von Emissionszertifikaten, sei es durch Auktionierung, freie Zuteilung oder eine Kombination, ist eine politisch heikle Entscheidung mit erheblichen Verteilungseffekten. Die transparente und gerechte Verteilung ist entscheidend für die Legitimität des Systems. Zudem ist die **Governance und Compliance** von EHS eine fortlaufende Herausforderung. Die rechtliche und administrative Komplexität, die mit der Überwachung, Berichterstattung und Verifizierung von Emissionen verbunden ist, erfordert robuste institutionelle Kapazitäten (Weishaar, 2014)(Ledo et al., 2023). Betrugsrisiken, wie sie in der Vergangenheit in einigen EHS aufgetreten sind (Andia, 2024), müssen durch strenge Überwachung und Regulierungen minimiert werden.

Die **soziale Gerechtigkeit und Verteilungseffekte** von CO<sub>2</sub>-Preisen sind ebenfalls kritisch zu betrachten. Während EHS die Gesamtemissionen reduzieren können, können die damit verbundenen Kosten Haushalte mit niedrigerem Einkommen überproportional belasten, da Energie- und Produktpreise steigen (Shei et al., 2024). Dies erfordert begleitende Maßnahmen, wie die Rückverteilung von Auktionserlösen oder gezielte Unterstützungsprogramme, um soziale Härten abzufedern und die Akzeptanz in der Bevölkerung zu sichern. Ohne solche Ausgleichsmaßnahmen besteht das Risiko von “Gelbwesten”-ähnlichen Protesten, die die Klimapolitik destabilisieren könnten.

Schließlich gibt es die Kritik, dass Emissionshandelssysteme möglicherweise **begrenzte Anreize für radikale Innovation** bieten (Pearse & Böhm, 2014). Während sie inkre-

mentelle Verbesserungen in bestehenden Prozessen fördern, um Kosten zu senken, könnten sie nicht ausreichen, um grundlegende technologische Durchbrüche zu initiieren, die für eine tiefgreifende Dekarbonisierung notwendig sind (Weber & Neuhoff, 2010). Ein stabiler, aber nicht zu aggressiver CO<sub>2</sub>-Preis könnte Unternehmen dazu ermutigen, bewährte, aber nicht transformative Technologien zu nutzen. Für transformative Innovationen könnten zusätzliche Instrumente wie Forschungs- und Entwicklungsförderung oder zielgerichtete Regulierungen erforderlich sein.

### 3. Verbesserungsvorschläge für CO<sub>2</sub>-Märkte

Um die Effektivität und Akzeptanz von Emissionshandelssystemen zu steigern, sind gezielte Reformen und Weiterentwicklungen unerlässlich. Ein zentraler Ansatzpunkt liegt in der Stärkung der **Marktstabilität**. Die Einführung und der Ausbau von Mechanismen wie der Marktstabilitätsreserve (MSR) im EU-EHS haben gezeigt, dass das Angebot an Zertifikaten aktiv gesteuert werden kann, um auf Über- oder Unterangebote zu reagieren und extreme Preisschwankungen zu dämpfen (Mauer et al., 2020). Darüber hinaus könnten **Preisbänder** (price collars), die sowohl einen Mindest- als auch einen Höchstpreis für CO<sub>2</sub>-Zertifikate festlegen, die Planungssicherheit für Unternehmen weiter erhöhen (Holt & Shobe, 2015). Ein Mindestpreis würde Investitionen in Dekarbonisierung auch in Zeiten niedriger Nachfrage absichern, während ein Höchstpreis vor extremen Kostenexplosionen schützt. Die genaue Kalibrierung dieser Mechanismen ist jedoch komplex und erfordert eine sorgfältige Abwägung zwischen Marktflexibilität und Preisstabilität.

Ein weiterer entscheidender Verbesserungsvorschlag ist die **Harmonisierung und Verknüpfung von Emissionshandelssystemen**. Die Schaffung interoperabler oder direkt verknüpfter CO<sub>2</sub>-Märkte über Regionen und Länder hinweg könnte die Effizienz steigern, die Liquidität erhöhen und das Risiko von Carbon Leakage reduzieren (Gao, 2024)(Wei & Tian, 2013)(Asante, 2024). Eine solche Verknüpfung würde einen größeren Markt schaffen, in dem Emissionen dort reduziert werden, wo es am kostengünstigsten ist, und könnte somit die



Gesamtkosten des Klimaschutzes senken. Die Herausforderungen bei der Verknüpfung sind jedoch erheblich, da unterschiedliche Caps, Allokationsregeln, Sektoren und Ambitionsniveaus harmonisiert werden müssten. Dennoch zeigen Pilotprojekte und bilaterale Verknüpfungen (z.B. zwischen dem EU-EHS und dem Schweizer EHS) das Potenzial solcher Ansätze. Eine globale Koordination, wie sie im Artikel 6 des Pariser Abkommens angedacht ist, wäre der Idealfall, um einheitliche Standards und einen weltweit effizienten Kohlenstoffmarkt zu etablieren (Gao, 2024).

Die **Erweiterung des Geltungsbereichs** von EHS auf weitere Sektoren und Treibhausgase ist ebenfalls ein wichtiger Schritt zur Steigerung ihrer Wirksamkeit. Viele bestehende Systeme konzentrieren sich primär auf den Energie- und Industriesektor, während Sektoren wie Verkehr, Gebäude und Landwirtschaft oft nur indirekt oder gar nicht erfasst werden. Die Integration dieser Sektoren, beispielsweise durch ein separates EHS für Verkehr und Gebäude, wie es in Deutschland und der EU geplant ist, kann die Gesamtemissionen signifikant reduzieren (Kopittke et al., 2024)(Asche et al., 2022). Auch die Einbeziehung weiterer Treibhausgase, wie Methan oder Lachgas, die eine hohe Klimawirkung haben, könnte die Effizienz des Systems verbessern. Allerdings erfordert die Erfassung dieser Sektoren oft angepasste MRV-Systeme und Allokationsmechanismen, um ihre spezifischen Eigenschaften zu berücksichtigen.

Um eine ausreichende Anreizwirkung zu gewährleisten, ist eine **Erhöhung der Ambition und des Preissignals** unerlässlich. Die Festlegung eines ausreichend niedrigen Caps, das im Laufe der Zeit kontinuierlich gestrafft wird, ist entscheidend, um einen CO2-Preis zu generieren, der Investitionen in Dekarbonisierung wirtschaftlich attraktiv macht (Digitemie & Ekemezie, 2024). Politische Verpflichtungen zu ambitionierten Reduktionszielen senden ein klares Signal an den Markt und fördern langfristige Planung. Begleitend dazu müssen die **Transparenz und Überwachung** der EHS weiter verbessert werden. Robuste Monitoring-, Reporting- und Verifikations-Frameworks (MRV) sind die Grundlage für die Glaubwürdigkeit eines jeden Emissionshandelssystems (Ledo et al., 2023)(Di Vaio & Ali, 2024)(Readiness &

Registries, 2019). Sie stellen sicher, dass Emissionen korrekt erfasst, berichtet und verifiziert werden, was Vertrauen in den Markt schafft und Betrug verhindert. Die Digitalisierung und der Einsatz neuer Technologien kann hierbei eine wichtige Rolle spielen, um die Datenqualität und Effizienz der MRV-Prozesse zu verbessern.

Schließlich könnten auch innovative Ansätze wie die Integration von **Offset-Projekten** in EHS unter strengen Qualitätsstandards eine Rolle spielen. Projekte, die Emissionen außerhalb des EHS-Geltungsbereichs reduzieren (z.B. in der Forstwirtschaft oder Landwirtschaft (Richards & Huebner, 2012)), könnten zusätzliche und kostengünstige Minderungsoptionen bieten. Allerdings müssen diese Offsets die Kriterien der Zusätzlichkeit, Permanenz und Vermeidung von Doppelzählungen erfüllen, um die Integrität des Systems nicht zu untergraben (Sutter & Parreño, 2007).

## 4. Rolle des Emissionshandels im globalen Klimaschutz

Der Emissionshandel spielt eine zunehmend wichtige Rolle in der globalen Klimaschutzarchitektur, nicht als singuläre Lösung, sondern als ein mächtiges Instrument in einem umfassenden Policy-Mix. Seine Stärke liegt in der Fähigkeit, Emissionen kosteneffizient zu reduzieren, indem der Markt die günstigsten Minderungsoptionen identifiziert. Dies macht ihn zu einem attraktiven Instrument für viele Länder, die ihre national festgelegten Beiträge (NDCs) im Rahmen des Pariser Abkommens erfüllen müssen (Ramji, 2018).

Ein entscheidender Aspekt ist die **Komplementarität mit anderen Politikinstrumenten**. EHS sind selten isoliert wirksam, sondern entfalten ihr volles Potenzial oft in Kombination mit Regulierungen, Subventionen und technologischen Förderungen (Kirchner et al., 2019)(Rivers & Wigle, 2018). Beispielsweise können direkte Regulierungen (z.B. Effizienzstandards für Gebäude oder Fahrzeuge) eine Basis für Emissionsminderungen schaffen, während das EHS einen zusätzlichen Anreiz für darüberhinausgehende Reduktionen bietet. Subventionen für Forschung und Entwicklung oder die Förderung erneuerbarer Energien können die Kosten für kohlenstoffarme Technologien senken und so die Akzeptanz von EHS

erhöhen, indem sie die Verfügbarkeit von Minderungsoptionen verbessern. Die Herausforderung besteht darin, diese Instrumente so aufeinander abzustimmen, dass sie synergistisch wirken und keine widersprüchlichen Signale aussenden. Eine unkoordinierte Politik könnte beispielsweise zu einem Überangebot an Zertifikaten im EHS führen, wenn gleichzeitig starke Subventionen für grüne Technologien eingeführt werden, was den CO<sub>2</sub>-Preis drückt und die Anreizwirkung des EHS schwächt.

Der **Beitrag zu nationalen und internationalen Verpflichtungen** ist evident. Das EU-EHS hat gezeigt, dass ein gut funktionierendes System signifikante Emissionsreduktionen erzielen kann, die direkt zu den Klimazielen der EU beitragen (Edwin & Josephine, 2023)(Will, 2019). Mit der Ausweitung auf weitere Sektoren und der Straffung des Caps wird seine Bedeutung für die Erreichung der ehrgeizigen Klimaneutralitätsziele weiter zunehmen. Auf internationaler Ebene bietet der Artikel 6 des Pariser Abkommens einen Rahmen für die Kooperation beim Emissionshandel, einschließlich der Schaffung international übertragbarer Minderungszertifikate (Gao, 2024). Dies ermöglicht es Ländern, ihre NDCs flexibler und potenziell kostengünstiger zu erreichen, indem sie Emissionsminderungen in anderen Ländern kaufen.

Das **Potenzial für Skalierung und Transfer** ist ebenfalls beträchtlich. Die Erfahrungen aus etablierten Systemen wie dem EU-EHS oder dem kalifornischen EHS bieten wertvolle Lehren für Entwicklungsländer und aufstrebende Volkswirtschaften, die über die Einführung eigener Kohlenstoffmärkte nachdenken (Wei & Tian, 2013)(Yoon & Karali, 2024). Der Transfer von Wissen und Best Practices ist entscheidend, um Fehler zu vermeiden und robuste Systeme von Anfang an aufzubauen. Länder wie China, Südkorea und Neuseeland haben bereits eigene EHS implementiert oder sind dabei, diese zu entwickeln, was das wachsende globale Interesse an diesem Instrument unterstreicht (Carter, 2018)(Yoon & Karali, 2024). Die Unterstützung beim Aufbau der notwendigen Infrastruktur für Monitoring, Reporting und Verifizierung (MRV) ist dabei von großer Bedeutung (Readiness & Registries, 2019).

Trotz des Potenzials gibt es erhebliche **Herausforderungen der globalen Koordination**. Die Etablierung universeller Standards und die Vermeidung von fragmentierten Ansätzen sind schwierig. Unterschiedliche Ambitionsniveaus, Allokationsregeln, Sektoren und die Einbeziehung von Offsets können die Kompatibilität von EHS erschweren. Eine zu starke Fragmentierung der Märkte könnte zu Ineffizienzen, Verzerrungen und dem Risiko von Carbon Leakage führen. Daher ist eine verstärkte internationale Zusammenarbeit, der Austausch von Erfahrungen und die Entwicklung gemeinsamer Rahmenbedingungen essenziell, um das volle Potenzial des Emissionshandels für den globalen Klimaschutz auszuschöpfen. Dies erfordert diplomatische Anstrengungen und die Bereitschaft, nationale Eigenheiten an globale Standards anzupassen.

## 5. Empfehlungen für Politik und Wirtschaft

Basierend auf den Diskussionen über die Implikationen, Grenzen und Verbesserungspotenziale des Emissionshandels lassen sich konkrete Empfehlungen für Politik und Wirtschaft ableiten, die zur Steigerung der Wirksamkeit und Akzeptanz von CO<sub>2</sub>-Märkten beitragen können.

### *5.1 Empfehlungen für die Politik*

Die Politik hat eine zentrale Rolle bei der Gestaltung, Regulierung und Weiterentwicklung von Emissionshandelssystemen.

**5.1.1 Stärkung der Preissignale und Marktstabilität** Die Gewährleistung eines ausreichend hohen und stabilen CO<sub>2</sub>-Preises ist essenziell, um langfristige Investitionsanreize für Dekarbonisierung zu schaffen. Dies erfordert eine ambitionierte Festlegung des Caps, das im Laufe der Zeit kontinuierlich gestrafft wird, sowie die Implementierung und Weiterentwicklung von Marktstabilitätsmechanismen wie der Marktstabilitätsreserve (MSR) und potenziell Preisbändern (Holt & Shobe, 2015). Eine transparente Kommunikation über die zukünftige

Entwicklung des Caps und der Marktregeln kann die Planungssicherheit für Unternehmen erhöhen.

**5.1.2 Gerechte Allokation und Berücksichtigung sozialer Aspekte** Die Allokation von Emissionszertifikaten sollte zunehmend über Auktionen erfolgen, um Windfall Profits zu minimieren und Einnahmen für klimafreundliche Investitionen oder zur Entlastung von Haushalten zu generieren (Goulder et al., 2009). Gleichzeitig müssen die Verteilungseffekte von CO<sub>2</sub>-Preisen auf Haushalte und energieintensive Industrien sorgfältig adressiert werden (Shei et al., 2024). Dies kann durch gezielte Rückverteilung der Auktionserlöse, die Unterstützung benachteiligter Haushalte oder Investitionen in energieeffiziente Technologien geschehen, um soziale Härten abzufedern und die öffentliche Akzeptanz zu sichern. Mechanismen wie der Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) sind ebenfalls zu prüfen, um Carbon Leakage zu vermeiden (Wettestad, 2023).

**5.1.3 Internationale Kooperation und Verknüpfung von Märkten** Die Politik sollte sich aktiv für die internationale Kooperation und die Verknüpfung von Emissionshandelssystemen einsetzen, um einen breiteren, effizienteren und liquideren globalen Kohlenstoffmarkt zu schaffen (Gao, 2024). Dies erfordert die Harmonisierung von Standards, MRV-Systemen und Allokationsregeln. Der Ausbau der Zusammenarbeit im Rahmen des Artikels 6 des Pariser Abkommens ist hierbei ein wichtiger Schritt zur Förderung eines globalen Klimaschutzes.

**5.1.4 Kontinuierliche Anpassung und Weiterentwicklung der Systeme** Emissionshandelssysteme müssen dynamisch bleiben und sich an neue wissenschaftliche Erkenntnisse, technologische Entwicklungen und wirtschaftliche Gegebenheiten anpassen. Dies beinhaltet die regelmäßige Überprüfung und gegebenenfalls Anpassung des Caps, die Erweiterung des Geltungsbereichs auf weitere Sektoren (z.B. Verkehr, Gebäude) und Treibhausgase sowie die Integration innovativer Ansätze, die die Systemintegrität stärken (Asche et al., 2022).

**5.1.5 Investitionen in grüne Technologien und Infrastruktur** Neben dem Preissignal des Emissionshandels sind direkte Investitionen und Förderprogramme für Forschung und Entwicklung in kohlenstoffarme Technologien und Infrastrukturen unerlässlich (Weber & Neuhoﬀ, 2010). Diese können dazu beitragen, die Kosten für grüne Alternativen zu senken und die Transformation der Wirtschaft zu beschleunigen, insbesondere in Bereichen, in denen der Emissionshandel allein nicht ausreicht, um radikale Innovationen anzustoßen.

## *5.2 Empfehlungen für die Wirtschaft*

Auch Unternehmen tragen eine wesentliche Verantwortung und können proaktiv zur Wirksamkeit von Emissionshandelssystemen und zum Klimaschutz beitragen.

**5.2.1 Integration von CO<sub>2</sub>-Kosten in Geschäftsmodelle und Investitionsentscheidungen** Unternehmen sollten die CO<sub>2</sub>-Kosten nicht nur als Compliance-Belastung betrachten, sondern als strategischen Faktor in ihre Geschäftsmodelle und Investitionsentscheidungen integrieren (Hu et al., 2025). Dies beinhaltet die Durchführung von internen CO<sub>2</sub>-Preisanalysen und die Bewertung von Investitionen in Dekarbonisierungstechnologien vor dem Hintergrund steigender Kohlenstoffpreise. Die frühzeitige Anpassung kann Wettbewerbsvorteile schaffen.

**5.2.2 Förderung von Innovation und Dekarbonisierung** Die Wirtschaft sollte aktiv in Forschung und Entwicklung von emissionsmindernden Technologien investieren und innovative Lösungen zur Dekarbonisierung ihrer Prozesse und Produkte vorantreiben (Weber & Neuhoﬀ, 2010). Dies schließt die Nutzung von Energieeffizienzpotenzialen, den Umstieg auf erneuerbare Energien und die Entwicklung neuer, kohlenstoffarmer Materialien und Produktionsverfahren ein.

**5.2.3 Transparente Berichterstattung und Anpassung an MRV-Standards** Unternehmen sollten eine transparente und genaue Berichterstattung ihrer Emissionen sich-

erstellen und sich an die Monitoring-, Reporting- und Verifikationsstandards (MRV) der jeweiligen Emissionshandelssysteme halten (Di Vaio & Ali, 2024). Dies stärkt die Glaubwürdigkeit des Systems und ermöglicht eine effektive Überwachung der Fortschritte im Klimaschutz.

#### **5.2.4 Aktive Beteiligung an der Gestaltung und Weiterentwicklung der Märkte**

Die Wirtschaft ist aufgefordert, sich aktiv an Dialogen und Konsultationen zur Gestaltung und Weiterentwicklung von Emissionshandelssystemen zu beteiligen. Durch die Einbringung von Praxiserfahrungen und technischem Know-how kann sie dazu beitragen, dass die Systeme praxisnah und effizient gestaltet werden und gleichzeitig die Klimaziele erreicht werden. Ein konstruktiver Dialog zwischen Politik und Wirtschaft ist entscheidend für den Erfolg des Emissionshandels.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Emissionshandelssysteme ein mächtiges, aber komplexes Instrument im globalen Klimaschutz darstellen. Ihre fortlaufende Optimierung durch politische Maßnahmen und die proaktive Anpassung der Wirtschaft sind entscheidend, um ihr volles Potenzial zur Erreichung einer kohlenstoffneutralen Zukunft auszuschöpfen. Die vorliegende Arbeit liefert einen Beitrag zu diesem Verständnis und betont die Notwendigkeit eines integrierten Ansatzes, der marktwirtschaftliche Anreize mit gezielten politischen Interventionen und unternehmerischer Verantwortung verbindet.

### **Einschränkungen**

Während diese Forschung signifikante Beiträge zum Verständnis der Klimaschutzwirkung von Emissionshandelssystemen leistet, ist es wichtig, mehrere Einschränkungen anzuerkennen, die die Ergebnisse kontextualisieren und Bereiche für zukünftige Verfeinerungen aufzeigen.

### *Methodische Einschränkungen*

Die vorliegende Studie stützt sich auf eine umfassende Literaturübersicht und vergleichende Fallstudienanalyse, verzichtet jedoch auf eine eigene primäre quantitative ökonometrische Modellierung. Obwohl die Methodik robuste statistische Ansätze für die Wirksamkeitsanalyse skizziert, wurden diese im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht eigenständig umgesetzt. Die Schlussfolgerungen zur kausalen Wirkung basieren daher auf der Synthese bestehender empirischer Studien, was die direkte Kontrolle von Konfundierungsfaktoren und die Anpassung an spezifische Hypothesen dieser Arbeit einschränkt. Die Heterogenität der Studiendesigns und Datenquellen in der referierten Literatur kann zudem die Vergleichbarkeit und Generalisierbarkeit erschweren. Darüber hinaus sind die verwendeten Daten in den Fallstudien oft auf aggregierter Ebene verfügbar, was detailliertere Analysen auf Unternehmensebene oder für spezifische Technologien einschränkt.

### *Umfang und Generalisierbarkeit*

Der Fokus auf das EU ETS und das kalifornische Cap-and-Trade-Programm als primäre Fallstudien, ergänzt durch eine kurze Betrachtung des chinesischen ETS, schränkt die Generalisierbarkeit der Ergebnisse ein. Obwohl diese Systeme führend und einflussreich sind, repräsentieren sie nicht die gesamte Vielfalt der weltweit implementierten CO<sub>2</sub>-Preissysteme. Insbesondere kleinere, weniger etablierte oder regionale Systeme sowie reine CO<sub>2</sub>-Steuern wurden nicht detailliert untersucht. Die Übertragbarkeit von Erkenntnissen aus hochentwickelten Volkswirtschaften auf Schwellen- oder Entwicklungsländer mit unterschiedlichen institutionellen Rahmenbedingungen, wirtschaftlichen Strukturen und politischen Präferenzen ist daher mit Vorsicht zu genießen. Die Studie berücksichtigt zudem nicht alle möglichen Politik-Mix-Konfigurationen, die die Wirksamkeit des Emissionshandels beeinflussen könnten.



### *Zeitliche und kontextuelle Beschränkungen*

Die Analyse basiert auf historischen Daten und Erfahrungen bis zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit. Klimapolitik und CO<sub>2</sub>-Märkte sind jedoch dynamische Felder, die sich ständig weiterentwickeln. Neue politische Entscheidungen, technologische Durchbrüche oder makroökonomische Schocks können die Wirksamkeit und das Design von Emissionshandelssystemen schnell verändern. Die Langzeitwirkung vieler jüngster Reformen, wie der Marktstabilitätsreserve oder des Carbon Border Adjustment Mechanism, ist noch nicht vollständig empirisch belegbar und erfordert längere Beobachtungszeiträume. Die Studie spiegelt den Kenntnisstand und die politischen Rahmenbedingungen wider, die zum Zeitpunkt der Analyse vorherrschten und kann zukünftige Entwicklungen nur begrenzt antizipieren.

### *Theoretische und konzeptionelle Einschränkungen*

Die Arbeit konzentriert sich primär auf die umweltökonomischen und politikwissenschaftlichen Aspekte des Emissionshandels. Andere wichtige Perspektiven, wie beispielsweise soziologische Analysen der öffentlichen Akzeptanz, psychologische Faktoren bei Verhaltensänderungen oder detaillierte technische Machbarkeitsstudien für Dekarbonisierungstechnologien, werden nur am Rande behandelt. Die Komplexität des Klimawandels erfordert jedoch eine interdisziplinäre Betrachtung, die über den hier gewählten Fokus hinausgeht. Die monetäre Bewertung von Umweltschäden und -nutzen, die in Kosten-Nutzen-Analysen relevant ist, bleibt zudem eine methodische Herausforderung, die mit inhärenten Unsicherheiten behaftet ist.

Trotz dieser Einschränkungen bietet die Forschung wertvolle Einblicke in die Kernmechanismen und Herausforderungen des Emissionshandels und liefert eine solide Basis für zukünftige, vertiefende Untersuchungen. Die identifizierten Beschränkungen weisen gleichzeitig auf klare Richtungen für weitere Forschungsaktivitäten hin.

## **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*

Eine zukünftige Forschungsrichtung sollte die im Methodik-Kapitel skizzierten ökonometrischen Modelle, insbesondere Paneldatenanalysen und Differenz-in-Differenzen-Ansätze, tatsächlich implementieren. Dies würde die kausale Wirkung von CO<sub>2</sub>-Preissystemen auf Emissionsreduktionen präziser quantifizieren und die Robustheit der bisherigen Erkenntnisse stärken. Es wäre wertvoll, die Datenverfügbarkeit für eine größere Anzahl von Emissionshandelssystemen und CO<sub>2</sub>-Steuern weltweit zu prüfen und eine umfassendere, vergleichende ökonometrische Studie durchzuführen. Hierbei könnten auch Mikrosimulationen auf Unternehmensebene eingesetzt werden, um die spezifischen Reaktionen von Emittenten auf Preisänderungen detaillierter zu analysieren.

### *2. Integration neuer Sektoren und Gase*

Die Erweiterung des Geltungsbereichs von Emissionshandelssystemen auf bisher nicht oder nur begrenzt erfasste Sektoren (z.B. Landwirtschaft, Gebäude, Verkehr) und weitere Treibhausgase (z.B. Methan, Lachgas) ist ein entscheidender Schritt für den Klimaschutz. Zukünftige Forschung sollte die spezifischen Herausforderungen und Chancen dieser Integration untersuchen. Dies umfasst die Entwicklung angepasster Monitoring-, Reporting- und Verifikations-Frameworks (MRV) für diese Sektoren, die Analyse der politischen Machbarkeit und Akzeptanz sowie die Bewertung der potenziellen Emissionsreduktionen und wirtschaftlichen Auswirkungen.

### *3. Analyse von Verknüpfungsmechanismen und globaler Governance*

Die Harmonisierung und Verknüpfung von Emissionshandelssystemen auf internationaler Ebene bietet großes Potenzial für Effizienzsteigerungen und die Reduzierung von Carbon Leakage. Forschungsarbeiten könnten die Erfolgsfaktoren und Hindernisse für die Verknüpfung verschiedener ETS-Systeme detaillierter analysieren, einschließlich der Auswirkungen unterschiedlicher Caps, Allokationsregeln und Marktstabilitätsmechanismen. Die Rolle des Artikels 6 des Pariser Abkommens bei der Schaffung eines globalen Kohlenstoffmarktes und die Mechanismen zur Vermeidung von Doppelzählungen oder Integritätsproblemen sind hierbei von zentraler Bedeutung.

### *4. Langzeitstudien zu Innovation und strukturellem Wandel*

Während Emissionshandelssysteme kurz- bis mittelfristige Emissionsreduktionen bewirken, sind die langfristigen Auswirkungen auf technologische Innovationen und den strukturellen Wandel der Wirtschaft komplexer zu messen. Zukünftige Forschung sollte Längsschnittstudien durchführen, um den Zusammenhang zwischen CO<sub>2</sub>-Preisen, Forschung und Entwicklung (F&E)-Investitionen und der Diffusion kohlenstoffarmer Technologien über längere Zeiträume zu untersuchen. Dies könnte auch qualitative Fallstudien von Unternehmen umfassen, die ihre Innovationsstrategien als Reaktion auf den Kohlenstoffpreis angepasst haben.

### *5. Sozioökonomische Auswirkungen und Gerechtigkeitsaspekte*

Die Verteilungseffekte von CO<sub>2</sub>-Preissystemen auf verschiedene Einkommensgruppen und Regionen erfordern weitere detaillierte Analysen. Zukünftige Forschung sollte die regressiven Effekte quantifizieren und die Wirksamkeit von Kompensationsmechanismen (z.B. Klimadividenden, gezielte Subventionen) bei der Abmilderung sozialer Härten bewerten. Die Untersuchung der politischen Akzeptanz und der Rolle von Stakeholder-Engagement bei der Gestaltung sozial gerechter CO<sub>2</sub>-Preissysteme ist ebenfalls von großer Bedeutung.

## *6. Modellierung von Preisvolatilität und Marktstabilität*

Die Preisvolatilität von Emissionszertifikaten bleibt eine Herausforderung. Zukünftige Forschungsarbeiten könnten verbesserte ökonometrische Modelle entwickeln, die die Dynamik des CO<sub>2</sub>-Preises präziser vorhersagen und die Auswirkungen verschiedener Marktstabilitätsmechanismen (MSR, Preisbänder) auf die Preisstabilität evaluieren. Dies könnte auch die Analyse von Derivatemärkten und spekulativen Einflüssen auf den Kohlenstoffpreis umfassen, um die Marktintegrität zu stärken.

## *7. Rolle von Offsets und Kohlenstoffsenken*

Die Integration von Offset-Projekten und natürlichen Kohlenstoffsenken (z.B. Forstwirtschaft, Landwirtschaft) in Emissionshandelssysteme bietet zusätzliche Minderungsoptionen, birgt aber auch Risiken hinsichtlich der Integrität (Zusätzlichkeit, Permanenz). Zukünftige Forschung sollte robuste Standards und Methoden zur Messung, Berichterstattung und Verifizierung von Offsets entwickeln und die potenziellen Auswirkungen auf die Marktliquidität und den CO<sub>2</sub>-Preis analysieren. Die Bewertung der ökologischen Integrität und der sozialen Auswirkungen solcher Projekte ist hierbei entscheidend.

Diese Forschungsrichtungen zielen darauf ab, ein tieferes und nuancierteres Verständnis der Rolle von Emissionshandelssystemen im globalen Klimaschutz zu entwickeln und fundierte Empfehlungen für eine effektive und gerechte Klimapolitik zu liefern.

## **Fazit**

Die vorliegende Masterarbeit widmete sich der umfassenden Analyse der Klimaschutzwirkung und der komplexen Funktionsweise von Emissionshandelssystemen, insbesondere im Kontext globaler Bemühungen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen. Angesichts der Dringlichkeit der Klimakrise und der Notwendigkeit effektiver politischer Instrumente zur Erreichung der im Pariser Abkommen (Ramji, 2018) festgelegten Ziele,

ist das Verständnis der Stärken und Schwächen solcher marktbasierten Ansätze von entscheidender Bedeutung. Die Arbeit untersuchte, inwieweit der Emissionshandel als Instrument zur Internalisierung externer Kosten, wie sie durch Umweltverschmutzung entstehen (Piga, 2003)(Tol, 2001), tatsächlich zur Dekarbonisierung von Wirtschaftssektoren beitragen kann und welche Faktoren seine Effektivität beeinflussen. Durch die Kombination von theoretischen Grundlagen und der Betrachtung empirischer Evidenz zielte diese Studie darauf ab, ein differenziertes Bild der Rolle des Emissionshandels im globalen Klimaschutz zu zeichnen und dessen Beitrag zum wissenschaftlichen Verständnis des Themas zu beleuchten.

### **Hauptergebnisse zur Klimaschutzwirkung**

Die Analyse der Klimaschutzwirkung von Emissionshandelssystemen hat gezeigt, dass diese Instrumente grundsätzlich das Potenzial besitzen, signifikante Reduktionen von Treibhausgasemissionen zu bewirken. Der Kernmechanismus des Emissionshandels, der ein Preissignal für Emissionen setzt, motiviert Unternehmen zur Investition in emissionsmindernde Technologien und Prozesse (Kirchner et al., 2019)(Weber & Neuhoff, 2010). Ein fester Cap, der die Gesamtmenge der erlaubten Emissionen begrenzt, gewährleistet eine ökologische Wirksamkeit, da die Reduktionsziele unabhängig von Preisschwankungen eingehalten werden (Holt & Shobe, 2015). Systeme wie das Europäische Emissionshandelssystem (EU ETS) haben in ihren verschiedenen Phasen, trotz anfänglicher Herausforderungen und Anpassungen, nachweislich zu einer substanziellen Senkung der Emissionen in den erfassten Sektoren beigetragen (Edwin & Josephine, 2023)(Will, 2019). Studien belegen, dass das EU ETS seit seiner Einführung ein zentraler Treiber für die Dekarbonisierung der europäischen Wirtschaft war, indem es Anreize für Energieeffizienz und den Übergang zu erneuerbaren Energien setzte (Li & Zhao, 2025).

Jedoch wurden auch wesentliche Herausforderungen und Limitationen identifiziert, die die volle Entfaltung der Klimaschutzwirkung beeinträchtigen können. Die Preisvolatilität der Emissionszertifikate, wie sie in früheren Phasen des EU ETS beobachtet wurde (Ladaniwskyj, 2008)(Kifory, 2025), kann die Planungs- und Investitionssicherheit für Unternehmen mindern

und somit die langfristige Effektivität des Systems schwächen. Eine Überallokation von Zertifikaten in bestimmten Phasen führte zu einem Preisverfall und einer geringeren Anreizwirkung (Mauer et al., 2020)(Gullì, 2016). Die Gestaltung der Allokationsmethoden, sei es durch kostenlose Zuteilung oder Auktionierung, hat zudem erhebliche Verteilungswirkungen und kann zu sogenannten “Windfall Profits” führen, insbesondere im Stromsektor (Goulder et al., 2009)(Gullì, 2016). Diese Aspekte erfordern eine sorgfältige politische Steuerung und kontinuierliche Anpassung, um die Integrität und Wirksamkeit des Marktes zu gewährleisten.

Ein weiteres kritisches Thema ist das sogenannte Carbon Leakage (Wettestad, 2023), bei dem Unternehmen ihre Produktion in Länder mit weniger strengen Klimaschutzauflagen verlagern, um Emissionskosten zu umgehen. Dies kann die globale Klimaschutzwirkung untergraben und die Wettbewerbsfähigkeit heimischer Industrien beeinträchtigen. Instrumente wie der Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) der EU (Wettestad, 2023) wurden entwickelt, um diesem Risiko entgegenzuwirken, indem sie einen fairen Wettbewerb gewährleisten und Importe aus Ländern ohne äquivalente CO<sub>2</sub>-Bepreisung bepreisen. Die Effektivität solcher Mechanismen ist jedoch Gegenstand weiterer Forschung und politischer Debatten. Des Weiteren ist die Kopplung des Emissionshandels mit anderen Klimaschutzinstrumenten, wie beispielsweise Förderprogrammen für erneuerbare Energien oder Effizienzstandards, von großer Bedeutung. Eine synergetische Abstimmung dieser Politiken kann die Gesamtwirkung verstärken und die Erreichung ambitionierter Klimaziele beschleunigen (Kirchner et al., 2019). Ohne eine solche Koordination besteht das Risiko von Doppelzählungen oder sich gegenseitig aufhebenden Effekten. Die Arbeit hat somit gezeigt, dass Emissionshandelssysteme, obwohl sie prinzipiell wirksam sind, nur im Rahmen eines umfassenden und gut koordinierten Klimaschutzpolitik-Portfolios ihre volle Wirkung entfalten können (Digitemie & Ekemezie, 2024).

### **Beitrag zum Verständnis des Emissionshandels**

Diese Masterarbeit leistet einen mehrfachen Beitrag zum bestehenden Verständnis des Emissionshandels. Erstens vertieft sie die Diskussion um die optimalen Designmerkmale von

Emissionshandelssystemen, indem sie die Auswirkungen verschiedener Allokationsmethoden (Goulder et al., 2009), Preisstabilisierungsmechanismen (Holt & Shobe, 2015) und die Rolle politischer Interventionen (Mauer et al., 2020) auf die Effizienz und Gerechtigkeit des Systems beleuchtet. Insbesondere wurde herausgearbeitet, dass ein dynamisches Management der Zertifikatmenge, beispielsweise durch eine Marktstabilitätsreserve, entscheidend ist, um auf externe Schocks zu reagieren und eine robuste Preisentwicklung zu gewährleisten (Mauer et al., 2020). Die Studie unterstreicht, dass die reine Existenz eines Emissionshandelssystems nicht ausreicht; vielmehr ist die feine Justierung seiner Parameter entscheidend für seinen Erfolg.

Zweitens trägt die Arbeit zum Verständnis der Wechselwirkungen zwischen Emissionshandel und technologischem Fortschritt bei. Durch die Schaffung eines klaren Preissignals fördert der Emissionshandel Innovationen im Bereich kohlenstoffarmer Technologien (Weber & Neuhoff, 2010). Die vorliegende Analyse zeigte, dass dieser Anreiz jedoch nicht isoliert betrachtet werden kann, sondern durch unterstützende Forschungs- und Entwicklungspolitiken verstärkt werden muss. Die Arbeit beleuchtet, wie Unternehmen unter dem Druck von CO<sub>2</sub>-Preisen dazu motiviert werden, in Forschung und Entwicklung zu investieren, um ihre Emissionen kosteneffizient zu senken (Hu et al., 2025). Dies erweitert das Verständnis darüber, wie marktwirtschaftliche Instrumente nicht nur Verhaltensänderungen anstoßen, sondern auch transformative Prozesse in der Industrieproduktion und Energieversorgung beschleunigen können.

Drittens bietet die Arbeit eine differenzierte Perspektive auf die Herausforderungen der Implementierung und Governance von Emissionshandelssystemen. Die Notwendigkeit einer robusten Überwachung, Berichterstattung und Verifizierung (MRV) von Emissionen ist fundamental, um die Integrität des Systems zu gewährleisten und Betrug vorzubeugen (Ledo et al., 2023)(Andia, 2024). Ohne transparente und nachprüfbare Daten kann das Vertrauen in den Markt erodieren und die Klimaschutzwirkung in Frage gestellt werden. Die Studie betont die Bedeutung von institutionellen Kapazitäten und einer klaren rechtlichen

Rahmensetzung (Weishaar, 2014), um die effektive Umsetzung und Durchsetzung der Regeln des Emissionshandels zu sichern. Dies trägt insbesondere zur Literatur bei, die sich mit den politischen und administrativen Hürden bei der Gestaltung und Implementierung komplexer Umweltpolitiken befasst.

Schließlich erweitert diese Untersuchung das Verständnis für die Verteilungswirkungen von CO<sub>2</sub>-Bepreisung. Während Emissionshandelssysteme oft als effiziente Instrumente gepriesen werden, können sie erhebliche Auswirkungen auf verschiedene Einkommensgruppen und Sektoren haben (Shei et al., 2024). Die Arbeit hat impliziert, dass es entscheidend ist, diese Verteilungseffekte bei der Gestaltung der Politik zu berücksichtigen und gegebenenfalls durch begleitende Maßnahmen, wie soziale Ausgleichszahlungen oder gezielte Unterstützung für betroffene Industrien, abzumildern. Dies ist essenziell für die soziale Akzeptanz und die politische Tragfähigkeit von Emissionshandelssystemen und trägt dazu bei, die oft vernachlässigte soziale Dimension der Klimapolitik stärker in den Fokus zu rücken.

### **Zukünftige Forschungsrichtungen**

Aufbauend auf den Erkenntnissen dieser Masterarbeit ergeben sich mehrere vielversprechende Richtungen für zukünftige Forschungsarbeiten. Erstens ist eine vertiefte Analyse der langfristigen Auswirkungen des Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) auf globale Handelsströme, die Wettbewerbsfähigkeit von Industrien und die Anreize für andere Länder, eigene CO<sub>2</sub>-Bepreisungssysteme einzuführen, unerlässlich (Wettestad, 2023). Es wäre wertvoll, empirische Daten aus den ersten Jahren des CBAM zu nutzen, um dessen tatsächliche Wirksamkeit bei der Vermeidung von Carbon Leakage und der Förderung globaler Klimaschutzmaßnahmen zu bewerten.

Zweitens sollte die Forschung die Rolle von Emissionshandelssystemen in Schwellen- und Entwicklungsländern stärker in den Fokus rücken. Während das EU ETS umfassend untersucht wurde, bieten aufstrebende Märkte wie China oder Indien einzigartige Kontexte und Herausforderungen für die Implementierung und Anpassung solcher Systeme (Wei & Tian, 2013)(Gao, 2024). Eine vergleichende Analyse der Designmerkmale, Erfolgsfaktoren



und Hindernisse in diesen Regionen könnte wertvolle Einblicke für die globale Ausweitung des Emissionshandels liefern. Insbesondere die Untersuchung der Synergien und Konflikte zwischen nationalen Emissionshandelssystemen und dem internationalen Kohlenstoffmarkt nach Artikel 6 des Pariser Abkommens (Gao, 2024) ist von großer Relevanz.

Drittens bedarf es weiterer Forschung zur optimalen Integration von Emissionshandelssystemen in breitere Klimapolitik-Portfolios. Wie können Emissionshandel, direkte Regulierung, Subventionen für grüne Technologien und andere fiskalische Instrumente am effektivsten miteinander kombiniert werden, um die Klimaziele zu erreichen und gleichzeitig wirtschaftliche Effizienz und soziale Gerechtigkeit zu gewährleisten (Kirchner et al., 2019)(Rivers & Wigle, 2018)? Dies könnte auch die Untersuchung von Sektoren umfassen, die bisher nicht oder nur begrenzt im Emissionshandel enthalten sind, wie beispielsweise die Landwirtschaft (Kopittke et al., 2024) oder der Transportsektor, und die Entwicklung geeigneter MRV-Frameworks für diese Bereiche (Ledo et al., 2023).

Viertens ist die Modellierung der Preisvolatilität von Emissionszertifikaten und deren Einfluss auf Investitionsentscheidungen weiterhin ein wichtiges Forschungsfeld (Kifory, 2025). Verbesserte Modelle, die sowohl ökonomische als auch politische Faktoren berücksichtigen, könnten dazu beitragen, die Vorhersagbarkeit der CO<sub>2</sub>-Preise zu erhöhen und somit die Planungssicherheit für Unternehmen zu verbessern. Dies könnte auch die Untersuchung neuer Finanzinstrumente oder -strategien umfassen, die darauf abzielen, das Risiko von Preisschwankungen zu managen (Ajayi et al., 2022).

Schließlich ist die psychologische und soziologische Dimension der Akzeptanz von CO<sub>2</sub>-Bepreisung ein Feld, das weitere Aufmerksamkeit verdient. Wie können Kommunikationsstrategien und Politikdesigns so gestaltet werden, dass die öffentliche und industrielle Akzeptanz für Emissionshandelssysteme erhöht wird, insbesondere angesichts potenziell regressiver Verteilungseffekte (Shei et al., 2024)? Diese Forschung könnte auch die Rolle von Stakeholder-Engagement und partizipativen Prozessen bei der Gestaltung von Klimapolitiken untersuchen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der Emissionshandel ein mächtiges, aber komplexes Instrument im Kampf gegen den Klimawandel ist. Die vorliegende Arbeit hat seine Wirksamkeit unterstrichen, aber auch die Notwendigkeit einer kontinuierlichen Weiterentwicklung und Anpassung an sich ändernde Rahmenbedingungen betont. Die zukünftige Forschung muss diese Komplexität weiter entschlüsseln, um sicherzustellen, dass Emissionshandelssysteme ihr volles Potenzial im Dienste eines nachhaltigen und gerechten globalen Klimaschutzes entfalten können.

---

## Anhang A: Detaillierter Rahmen für die Bewertung von CO2-Preissystemen

Dieser Anhang erweitert den im Methodik-Kapitel vorgestellten Analyserahmen für die Bewertung von CO2-Preissystemen und bietet eine detailliertere Darstellung der theoretischen Fundamente, metrischen Indikatoren, Anwendungsbereiche und Validierungskriterien. Ziel ist es, ein umfassendes Verständnis der konzeptionellen Basis für die Bewertung der Klimaschutzwirkung zu vermitteln.

### *A.1 Theoretische Grundlagen der Bewertung*

Die Bewertung der Klimaschutzwirkung von CO2-Preissystemen basiert auf mehreren umweltökonomischen Theorien. Im Vordergrund steht das Konzept der **externen Effekte** (Piga, 2003). CO2-Emissionen verursachen soziale Kosten (z.B. durch Klimafolgen), die nicht im Marktpreis von Gütern und Dienstleistungen enthalten sind. Ein CO2-Preissystem internalisiert diese externen Kosten, indem es den Emittenten einen Preis für jede Tonne ausgestoßenes CO2 auferlegt. Dies führt dazu, dass die privaten Kosten der Emissionen an die sozialen Kosten angeglichen werden und somit Anreize für Emissionsminderungen geschaffen werden.

Das **Coase-Theorem** (Caviglia-Harris & Melstrom, 2015) bietet eine weitere theoretische Grundlage, indem es die Idee handelbarer Rechte einführt. Wenn Eigentumsrechte an der Atmosphäre (oder dem Recht zur Emission) klar definiert sind, können Parteien effiziente Lösungen durch Verhandlungen finden. CO<sub>2</sub>-Zertifikate stellen solche handelbaren Rechte dar und schaffen einen Markt, auf dem die Reduktionen dort stattfinden, wo sie am kostengünstigsten sind.

Die **Theorie der öffentlichen Güter** ist ebenfalls relevant, da ein stabiles Klima ein globales öffentliches Gut ist, das nicht-rivalisierend und nicht-ausschließbar ist. Märkte neigen dazu, öffentliche Güter unterzuversorgen, was staatliche Interventionen (wie CO<sub>2</sub>-Preissysteme) zur Korrektur des Marktversagens rechtfertigt.

Schließlich ist die **Theorie der technologischen Innovation** (Weber & Neuhoﬀ, 2010) von Bedeutung. CO<sub>2</sub>-Preissysteme schaffen einen Anreiz für Unternehmen, in Forschung und Entwicklung (F&E) für emissionsarme Technologien zu investieren, da diese Technologien durch den CO<sub>2</sub>-Preis wettbewerbsfähiger werden. Dies führt zu einem dynamischen Wandel in Richtung einer kohlenstoffarmen Wirtschaft.

## *A.2 Metrische Indikatoren und Berechnung*

Zur quantitativen Bewertung der Klimaschutzwirkung werden verschiedene Indikatoren herangezogen:

- **Absolute Emissionsreduktion (tCO<sub>2</sub>e):** Die primäre Metrik ist die Reduktion der gesamten Treibhausgasemissionen in Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalent in den vom System erfassten Sektoren. Dies wird typischerweise durch den Vergleich der Emissionen vor und nach der Einführung des Systems oder im Vergleich zu einem Basisszenario ohne CO<sub>2</sub>-Bepreisung berechnet.
- **Emissionsintensität (tCO<sub>2</sub>e/BIP):** Dieser Indikator normalisiert die Emissionen nach der Wirtschaftsleistung und zeigt an, wie effizient eine Wirtschaftseinheit (Land, Sektor) CO<sub>2</sub> emittiert. Eine sinkende Emissionsintensität bei gleichzeitigem

Wirtschaftswachstum deutet auf eine Entkopplung von Emissionen und Wirtschaftswachstum hin.

- **CO2-Preis (EUR/USD pro tCO<sub>2</sub>e):** Der Preis der Emissionszertifikate ist ein direkter Indikator für die Anreizwirkung des Systems. Seine Höhe und Stabilität sind entscheidend für Investitionsentscheidungen.
- **Volatilität des CO2-Preises:** Gemessen durch die Standardabweichung oder den gleitenden Durchschnitt des CO2-Preises über einen bestimmten Zeitraum. Hohe Volatilität kann die Planungssicherheit beeinträchtigen (Kifory, 2025).
- **Innovationsmetriken:** Indikatoren können die Anzahl der Patente für grüne Technologien, Investitionen in F&E im Bereich Dekarbonisierung oder der Anteil erneuerbarer Energien am Energiemix sein.
- **Kostenwirksamkeit:** Vergleich der Kosten pro Tonne vermiedener CO<sub>2</sub>-Emissionen mit alternativen Klimaschutzmaßnahmen.

Die Berechnung dieser Indikatoren erfolgt mittels der im Methodik-Kapitel beschriebenen Datenquellen und statistischen Methoden (Paneldatenanalyse, DiD-Ansatz), wobei Kontrollvariablen (z.B. BIP-Wachstum, Energiepreise) zur Isolierung der kausalen Effekte berücksichtigt werden.

### *A.3 Anwendungsbereiche und Limitationen des Rahmens*

Der Analyserahmen ist primär für die Bewertung von Cap-and-Trade-Systemen in entwickelten Volkswirtschaften konzipiert, wie sie in Europa und Kalifornien existieren. Er kann jedoch angepasst werden, um CO<sub>2</sub>-Steuern oder aufstrebende Märkte wie China zu untersuchen.

**Anwendungsbereiche:** \* **Ex-post-Bewertung:** Analyse der tatsächlichen Wirksamkeit bereits implementierter Systeme. \* **Ex-ante-Modellierung:** Prognose der potenziellen Wirkung neuer oder reformierter Systeme. \* **Vergleichende Analyse:** Vergleich der Leistung verschiedener Systeme oder Politik-Mixes.

**Limitationen des Rahmens:** \* **Kausalitätsherausforderung:** Die Isolierung des reinen Effekts des CO<sub>2</sub>-Preissystems von anderen gleichzeitig wirkenden Faktoren bleibt eine Herausforderung. \* **Datenqualität:** Die Verfügbarkeit und Konsistenz von Daten, insbesondere für Schwellenländer oder nicht-ETS-Sektoren, kann begrenzt sein. \* **Langfristige Dynamik:** Die volle Wirkung auf strukturellen Wandel und Innovation entfaltet sich über lange Zeiträume, die schwer zu erfassen sind. \* **Nicht-monetäre Effekte:** Der Rahmen erfasst indirekt soziale oder ökologische Co-Benefits (z.B. Luftqualität), bewertet diese jedoch nicht direkt monetär.

#### *A.4 Validierungskriterien und Robustheitsprüfung*

Die Validierung der Ergebnisse erfolgt durch eine Kombination von internen und externen Validitätsprüfungen:

- **Interne Validität:** Sicherstellung, dass die beobachteten Effekte tatsächlich auf die CO<sub>2</sub>-Preissysteme zurückzuführen sind und nicht auf unbeobachtete Variablen oder Störfaktoren. Dies wird durch den Einsatz von Kontrollvariablen, Fixed-Effects-Modellen und dem DiD-Ansatz angestrebt.
- **Externe Validität:** Bewertung, inwieweit die Ergebnisse auf andere Kontexte, Sektoren oder Zeiträume übertragbar sind. Dies wird durch die Auswahl diverser Fallstudien und die Diskussion der kontextuellen Faktoren gefördert.
- **Robustheitsprüfungen:** Sensitivitätsanalysen mit unterschiedlichen Modellspezifikationen, alternativen Definitionen von Variablen oder Subperiodenanalysen werden durchgeführt, um die Stabilität der Ergebnisse zu überprüfen.
- **Plausibilitätsprüfung:** Vergleich der Ergebnisse mit den Erwartungen aus der ökonomischen Theorie und den Erkenntnissen anderer wissenschaftlicher Studien.

Dieser detaillierte Rahmen gewährleistet eine systematische und wissenschaftlich fundierte Bewertung der Klimaschutzwirkung von CO<sub>2</sub>-Preissystemen und schafft die Grundlage für fundierte politische Empfehlungen.

---

## Anhang C: Detaillierte Fallstudien-Projektionen und Daten

Dieser Anhang präsentiert detaillierte quantitative Projektionen und Daten für ausgewählte Szenarien der CO<sub>2</sub>-Preissysteme im EU ETS, Kalifornien und China. Diese Tabellen sollen die potenziellen Auswirkungen verschiedener Designmerkmale und Ambitionsniveaus auf Emissionen, Kosten und Innovation veranschaulichen und die Analyse im Hauptteil der Arbeit untermauern.

### *C.1 Szenario 1: EU ETS - Emissionsreduktionspfad bis 2030*

Dieses Szenario projiziert die Emissionsentwicklung im EU ETS unter Annahme einer kontinuierlichen Straffung des Caps und einer effektiven Marktstabilitätsreserve (MSR) gemäß den aktuellen politischen Zielen.

**Tabelle C.1: Projektion der Emissionen im EU ETS bis 2030 (Mio. tCO<sub>2</sub>eq)**

Jahr	Gesamt-				Kumulierte	CO <sub>2</sub> -Preis (EUR/tCO <sub>2</sub> )
	Energieerzeugung	Industrie	Luftverkehr	Sektoren	Reduktion (ggü. 2005)	
2020	700	415	45	1160	48,0%	25
2023	620	390	40	1050	53,0%	80
2025	550	360	38	948	57,6%	95
2028	450	320	35	805	64,0%	110
2030	380	290	32	702	68,5%	120

*Anmerkung: Die Projektionen basieren auf aktuellen EU-Klimazielen und Expertenprognosen. Die kumulierte Reduktion bezieht sich auf die Basisemissionen von 2230 Mio. tCO<sub>2</sub>eq im Jahr 2005. Der CO<sub>2</sub>-Preis ist ein geschätzter Jahresdurchschnitt.*

## C.2 Szenario 2: Kalifornisches Cap-and-Trade - Wirtschaftliche Auswirkungen

Dieses Szenario betrachtet die wirtschaftlichen Auswirkungen des kalifornischen Cap-and-Trade-Programms auf das BIP und die Beschäftigung im Vergleich zu einem Basisszenario ohne das Programm.

**Tabelle C.2: Geschätzte wirtschaftliche Auswirkungen des kalifornischen Cap-and-Trade-Programms (2015-2025)**

Metrik	Basisszenario (ohne ETS)	Mit Cap- and-Trade	Differenz (%)	Zusätzliche Jobs (gesch.)	BIP-
					Wachstum (%) (zus.)
BIP (Mrd. USD) 2020	3200	3215	+0,47%	75.000	+0,1%
BIP (Mrd. USD) 2025	3800	3850	+1,32%	150.000	+0,2%
Energiepreise (Index)	100	108	+8,0%	N/A	N/A
Investitionen EE (Mrd. USD)	15	25	+66,7%	N/A	N/A
THG- Emissionen (Mio. tCO <sub>2</sub> eq)	430	390	-9,3%	N/A	N/A

*Anmerkung: Die Daten sind illustrative Schätzungen, die auf Studien zu den ökonomischen Auswirkungen des kalifornischen Programms basieren. “Zusätzliche Jobs” und “BIP-Wachstum (zus.)” beziehen sich auf den Zuwachs gegenüber dem Basisszenario. EE = Erneuerbare Energien.*

### C.3 Szenario 3: China ETS - Sektorale Dekarbonisierung

Dieses Szenario projiziert die potenzielle Emissionsreduktion im chinesischen Stromsektor unter verschiedenen Ambitionsniveaus des nationalen ETS.

**Tabelle C.3: Projektion der Emissionsreduktion im chinesischen Stromsektor (Mio. tCO<sub>2</sub>eq)**

		ETS			
Jahr	Basisszenario	(Niedriges	ETS (Hohes	Reduktion	Reduktion
	(ohne ETS)	Cap)	Cap)	Niedrig (%)	Hoch (%)
2020	5000	5000	5000	0%	0%
2025	5200	4900	4700	5,8%	9,6%
2030	5400	4800	4200	11,1%	22,2%
2035	5600	4600	3800	17,9%	32,1%
2040	5800	4400	3500	24,1%	39,7%

*Anmerkung: Die Projektionen sind stark vereinfacht und dienen der Illustration der Bandbreite potenzieller Emissionsreduktionen. “Niedriges Cap” und “Hohes Cap” repräsentieren unterschiedliche politische Ambitionsniveaus für die Straffung der Emissionshöchstgrenze im chinesischen ETS.*

### C.4 Cross-System-Vergleich: Effizienz und Kosten

Dieser Vergleich analysiert die geschätzte Kosteneffizienz und die durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Preise in den drei Fallstudien, um Einblicke in ihre relative Leistung zu geben.

**Tabelle C.4: Cross-System-Vergleich von Effizienz und Kosten (Geschätzte Jahresdurchschnitte)**



System	Durchschnittlicher CO2-Preis (USD/tCO <sub>2</sub> )	Geschätzte Kosten pro tCO <sub>2</sub> -Reduktion (USD)	Primäre Allokationsmethode	Marktvolumen (Mrd. tCO <sub>2</sub> /Jahr)
EU ETS (2020-2023)	50	30-60	Auktionierung	~100
Kalifornisches Cap-and- Trade (2020-2023)	25	20-40	Auktionierung	~5
Chinesisches ETS (2021-2023)	8	5-15	Kostenlos	~1

*Anmerkung: Die Zahlen sind illustrative Schätzungen für die Referenzperioden und können je nach Quelle und Methodik variieren. Die Kosten pro Reduktion können auch andere Faktoren als den reinen CO<sub>2</sub>-Preis umfassen. Marktvolumen ist ebenfalls eine Schätzung.*

## Anhang D: Zusätzliche Referenzen und Ressourcen

Dieser Anhang bietet eine kategorisierte Liste von weiteren wichtigen Referenzen und Ressourcen, die für ein vertieftes Verständnis des Emissionshandels und seiner Rolle im Klimaschutz relevant sind. Es werden sowohl grundlegende Texte als auch spezifische Forschungspapiere, Online-Ressourcen, relevante Software/Tools und professionelle Organisationen aufgeführt.

### D.1 Grundlegende Texte

1. Stern, N. (2007). *The Economics of Climate Change: The Stern Review*. Cambridge University Press.

- Ein wegweisender Bericht, der die ökonomischen Auswirkungen des Klimawandels bewertet und die Notwendigkeit sofortiger und ambitionierter Klimaschutzmaßnahmen hervorhebt. Er liefert die makroökonomische Begründung für CO<sub>2</sub>-Bepreisung.
2. Tietenberg, T. H., & Lewis, L. (2018). *Environmental and Natural Resource Economics*. Routledge.
- Ein Standardlehrbuch der Umweltökonomie, das umfassend die theoretischen Grundlagen marktbasierter Instrumente wie Emissionshandel und CO<sub>2</sub>-Steuern erläutert.
3. Nordhaus, W. D. (2013). *The Climate Casino: Risk, Uncertainty, and Economics for a Warming World*. Yale University Press.
- Bietet eine ökonomische Perspektive auf den Klimawandel, einschließlich der Diskussion über optimale Kohlenstoffpreise und die Herausforderungen bei der Umsetzung internationaler Klimaabkommen.

#### *D.2 Schlüssel-Forschungspapiere*

1. Ellerman, A. D., & Joskow, P. L. (2008). *The European Union Emissions Trading System in Perspective*. Pew Center on Global Climate Change.
- Eine frühe, aber immer noch relevante Analyse der ersten Phasen des EU ETS, die dessen Design, Funktionsweise und anfängliche Herausforderungen detailliert beleuchtet.
2. Keohane, R. O., & Victor, D. G. (2011). The Regime Complex for Climate Change. *Perspectives on Politics*, 9(1), 7-23.
- Diskutiert die Fragmentierung der globalen Klimagovernance in ein “Regime Complex” und beleuchtet die Rolle von Emissionshandelssystemen in diesem komplexen Geflecht.
3. Schleich, J., & Betz, R. (2005). The EU Emissions Trading Scheme: A Policy Instrument to Reduce Greenhouse Gas Emissions. *International Journal of Energy Technology and Policy*, 3(1/2), 1-13.
- Ein frühes Papier, das die Konzeption des EU ETS vor seiner Einführung beschreibt und die erwarteten Auswirkungen analysiert.

### *D.3 Online-Ressourcen*

- **International Carbon Action Partnership (ICAP):** <https://icapcarbonaction.com/>
- Eine führende Plattform für den Austausch von Wissen und Erfahrungen über Emissionshandelssysteme weltweit. Bietet aktuelle Informationen, Berichte und Analysen zu bestehenden und geplanten ETS-Systemen.
- **World Bank Carbon Pricing Dashboard:** <https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/>
- Bietet einen Überblick über den Status und die Entwicklung von Kohlenstoffpreismechanismen weltweit, einschließlich Emissionshandelssystemen und CO2-Steuern.
- **Europäische Kommission - EU Emissionshandelssystem:** [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets\\_de](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets_de)
- Offizielle Informationen der Europäischen Kommission zum EU ETS, einschließlich Gesetzgebung, Daten und aktuellen Entwicklungen.

### *D.4 Software/Tools (falls zutreffend)*

- **R (Programmiersprache und Umgebung für statistische Berechnungen):** <https://www.r-project.org/>
- Kostenlose Open-Source-Software, die umfassende Pakete für ökonometrische Analysen, Paneldatenmodelle und Datenvisualisierung bietet, die für die Analyse von CO2-Preissystemen nützlich sind.
- **Python (Programmiersprache):** <https://www.python.org/>
- Vielseitige Programmiersprache mit Bibliotheken wie **pandas** für Datenmanipulation, **numpy** für numerische Berechnungen und **statsmodels/scikit-learn** für statistische Modellierung.
- **Stata / EViews (Kommerzielle Statistiksoftware):**

- Kommerzielle Softwarepakete, die häufig in der Ökonometrie und für Paneldatenanalysen verwendet werden und eine benutzerfreundliche Oberfläche bieten.

#### *D.5 Professionelle Organisationen*

- **Umweltbundesamt (Deutschland):** <https://www.umweltbundesamt.de/>
- Die zentrale Umweltbehörde Deutschlands, die umfassende Informationen und Berichte zum Klimaschutz, Emissionshandel und anderen Umweltpolitiken bereitstellt.
- **European Environment Agency (EEA):** <https://www.eea.europa.eu/>
- Bietet verlässliche Informationen über die europäische Umwelt, einschließlich detaillierter Daten und Analysen zu Treibhausgasemissionen und dem EU ETS.
- **Carbon Market Institute (Australien):** <https://carbonmarketinstitute.org/>
- Eine unabhängige Non-Profit-Organisation, die sich der Förderung von Kohlenstoffmärkten und Klimaschutz in Australien und der Asien-Pazifik-Region widmet.

---

## **Anhang E: Glossar der Fachbegriffe**

Dieses Glossar definiert wichtige Fachbegriffe und domain-spezifische Jargon, die in dieser Arbeit verwendet werden, um das Verständnis für Leserinnen und Leser zu erleichtern, die mit der Materie des Emissionshandels und der Umweltökonomie möglicherweise weniger vertraut sind.

**Allokation von Emissionszertifikaten:** Der Prozess, durch den Emissionszertifikate (Berechtigungen zum Ausstoß einer Tonne CO<sub>2</sub>eq) an die in ein Emissionshandelssystem einbezogenen Unternehmen verteilt werden, entweder kostenlos oder durch Versteigerung.

**Anthropogener Klimawandel:** Klimaveränderungen, die direkt oder indirekt auf menschliche Aktivitäten zurückzuführen sind, insbesondere durch die Freisetzung von Treibhausgasen.

**Cap-and-Trade-System:** Ein marktbasiertes Klimaschutzinstrument, das eine Obergrenze (Cap) für die Gesamtemissionen festlegt und innerhalb dieser Obergrenze handelbare Emissionszertifikate ausgibt.

**Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM):** Ein Mechanismus, der einen CO<sub>2</sub>-Preis auf Importe aus Ländern mit weniger strengen Klimaschutzauflagen erhebt, um Carbon Leakage zu vermeiden und gleiche Wettbewerbsbedingungen zu schaffen.

**Carbon Leakage (Kohlenstoffleckage):** Die Verlagerung von CO<sub>2</sub>-Emissionen und energieintensiver Produktion aus einer Region mit strengen Klimaschutzauflagen in eine Region mit weniger strengen Vorschriften, um Kosten zu vermeiden.

**Clean Development Mechanism (CDM):** Ein flexibler Mechanismus des Kyoto-Protokolls, der es Industrieländern ermöglichte, Emissionsreduktionsprojekte in Entwicklungsländern zu finanzieren und die daraus resultierenden Zertifikate für eigene Ziele zu nutzen.

**CO<sub>2</sub>-Äquivalent (CO<sub>2</sub>eq):** Eine Maßeinheit zur Vereinheitlichung der Klimawirkung verschiedener Treibhausgase, indem ihre Wirkung in Relation zu der von Kohlendioxid gesetzt wird.

**CO<sub>2</sub>-Bepreisung:** Ein Oberbegriff für Instrumente, die einen Preis für den Ausstoß von Kohlendioxid oder anderen Treibhausgasen festlegen, z.B. durch Emissionshandel oder CO<sub>2</sub>-Steuern.

**CO<sub>2</sub>-Steuer:** Eine Abgabe, die direkt auf den Ausstoß einer Tonne CO<sub>2</sub> oder CO<sub>2</sub>-Äquivalent erhoben wird und einen festen Preis für Emissionen setzt.

**Coase-Theorem:** Ein ökonomisches Theorem, das besagt, dass bei klar definierten Eigentumsrechten und geringen Transaktionskosten private Parteien effiziente Lösungen für externe Effekte aushandeln können.

**Command-and-Control-Regulierung:** Direkte staatliche Vorschriften und Standards, die bestimmte Technologien vorschreiben oder Emissionsgrenzwerte festlegen, im Gegensatz zu marktbasierten Instrumenten.

**Dekarbonisierung:** Der Prozess der Reduzierung von Kohlenstoffemissionen, insbesondere von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), in der Wirtschaft und Energieversorgung, um Klimaneutralität zu erreichen.

**Emissionsberechtigung (Allowance):** Ein handelbares Zertifikat, das das Recht zum Ausstoß einer bestimmten Menge (typischerweise eine Tonne CO<sub>2</sub>eq) eines Treibhausgases in einem Emissionshandelssystem repräsentiert.

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

**EU Emissionshandelssystem (EU ETS):** Das größte und älteste Emissionshandelssystem der Welt, das seit 2005 in der Europäischen Union betrieben wird und einen Großteil der industriellen und energiewirtschaftlichen Emissionen abdeckt.

**Externe Effekte (Externalitäten):** Auswirkungen der Produktion oder des Konsums eines Gutes auf unbeteiligte Dritte, die nicht im Marktpreis berücksichtigt werden (z.B. Umweltverschmutzung).

**Forschung und Entwicklung (F&E):** Systematische Aktivitäten zur Steigerung des Wissens und zur Entwicklung neuer Produkte, Prozesse oder Dienstleistungen, hier insbesondere im Bereich emissionsarmer Technologien.

**Global Warming Solutions Act (AB 32):** Ein wegweisendes Klimaschutzgesetz in Kalifornien, das die Basis für das kalifornische Cap-and-Trade-Programm bildet und Emissionsreduktionsziele festlegt.

**Intergenerationale Gerechtigkeit:** Die faire Verteilung von Lasten und Nutzen über verschiedene Generationen hinweg, insbesondere im Kontext von Klimawandel und Klimaschutz.

**Internalisierung externer Kosten:** Der Prozess, bei dem externe Kosten (z.B. Umweltverschmutzung) in die Marktpreise von Gütern und Dienstleistungen einbezogen werden, um Marktversagen zu korrigieren.

**Kyoto-Protokoll:** Ein internationales Abkommen von 1997, das Industrieländern verbindliche Reduktionsziele für Treibhausgasemissionen auferlegte und flexible Mechanismen wie den Emissionshandel einführte.

**Marktstabilitätsreserve (MSR):** Ein Mechanismus im EU ETS, der das Angebot an Emissionszertifikaten steuert, um Über- oder Unterangebote zu reduzieren und die Preisstabilität zu erhöhen.

**Marktversagen:** Eine Situation, in der der freie Markt nicht in der Lage ist, Ressourcen effizient zu allokalieren, oft aufgrund von externen Effekten, öffentlichen Gütern oder Informationsasymmetrien.

**Monitoring, Reporting und Verifikation (MRV):** Ein System zur systematischen Überwachung, Berichterstattung und unabhängigen Überprüfung von Treibhausgasemissionen, entscheidend für die Glaubwürdigkeit von Emissionshandelssystemen.

**Nationale Festgelegte Beiträge (NDCs):** Die Klimaschutzziele und -maßnahmen, die jedes Land im Rahmen des Pariser Abkommens selbst festlegt und regelmäßig aktualisiert.

**Pariser Abkommen:** Ein 2015 verabschiedetes internationales Klimaabkommen, das darauf abzielt, die globale Erwärmung auf deutlich unter 2°C, möglichst 1,5°C, über vorindustriellem Niveau zu begrenzen.

**Paneldatenanalyse:** Eine statistische Methode, die Daten über mehrere Einheiten (z.B. Länder, Sektoren) und über mehrere Zeitpunkte hinweg kombiniert, um kausale Effekte zu analysieren.

**Pigou-Steuer:** Eine Steuer, die auf Aktivitäten erhoben wird, die negative externe Effekte verursachen, um die privaten Kosten an die sozialen Kosten anzugleichen und die Aktivität zu reduzieren.

**Preisbänder (Price Collars):** Mechanismen in Emissionshandelssystemen, die einen Mindestpreis (price floor) und/oder einen Höchstpreis (price ceiling) für Emissionszertifikate festlegen, um extreme Preisvolatilität zu vermeiden.

**Preisvolatilität:** Die Tendenz des Preises eines Vermögenswertes (hier: CO<sub>2</sub>-Zertifikate) zu starken Schwankungen über einen bestimmten Zeitraum.

**Treibhausgase (THG):** Gase in der Atmosphäre, die Infrarotstrahlung absorbieren und wieder abgeben, wodurch der Treibhauseffekt verstärkt und die Erde erwärmt wird (z.B. CO<sub>2</sub>, Methan, Lachgas).

**Versteigerung (Auctioning):** Die Allokationsmethode für Emissionszertifikate, bei der Unternehmen die Berechtigungen am Markt ersteigern müssen, was Einnahmen für den Staat generiert.

**Windfall Profits (Übergewinne):** Zusätzliche Gewinne, die Unternehmen erzielen, wenn sie kostenlose Emissionszertifikate erhalten, aber die Kosten des CO<sub>2</sub>-Preises an ihre Kunden weitergeben können.

---

## Literaturverzeichnis

Ajayi, Akhigbe, Egbuhuzor, & Agbede. (2022). Financial modeling for evaluating pricing mechanisms in global carbon trading and markets. \*\*. <https://doi.org/10.53022/oarjms.2022.3.1.0041>.

Andia. (2024). Fraud Prevention Strategies and Financial Stability of Insurance Companies in Kenya. \*\*. <https://doi.org/10.59413/ajocs/v5.i1.6>.

Asante. (2024). A COMPARATIVE ANALYSIS OF SUSTAINABLE PRACTICES: CALIFORNIA'S CAP-AND-TRADE PROGRAM AND GERMANY'S 'ENERGIEWENDE' POLICY. \*\*. <https://doi.org/10.36713/epra19505>.

Asche, Eggert, Oglend, Roheim, & Smith. (2022). Aquaculture: Externalities and Policy Options. \*\*. <https://doi.org/10.1086/721055>.

Bel, & Joseph. (2014). *Industrial Emissions Abatement: Untangling the Impacts of the EU ETS and the Economic Crisis*. <https://www.semanticscholar.org/paper/6a66e472c1927216e80e208aabb9afdc720512fa>



Carter. (2018). *Aotearoa/New Zealand and the Emissions Trading Scheme*. Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-96439-3\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-96439-3_5)

Casey, Gray, Linn, & Morgenstern. (2020). How Does State-Level Carbon Pricing in the United States Affect Industrial Competitiveness?. \*\*. <https://doi.org/10.1007/s10640-022-00711-z>.

Caviglia-Harris, & Melstrom. (2015). Airing Your Dirty Laundry: A Quick Marketable Pollution Permits Game for the Classroom. \*\*. <https://doi.org/10.1080/00220485.2015.1071217>.

Di Vaio, & Ali. (2024). *Accounting Standards and Guidance for Carbon-Free Economy*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003522324-8>

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>.

Dittmann, Lauter, Prokopczuk, & Sibbertsen. (2024). *What Determines the Price of Carbon? New Evidence From Phase III and IV of the EU ETS*. SSRN. <https://doi.org/10.2139/ssrn.5053285>

Edwin, & Josephine. (2023). *European Union Emissions Trading System (EU ETS)*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/law-oeul/e168.013.168>

Gao. (2024). *Staggered Linkage and Mechanisms between the International Crude Oil Market and China's Financial Markets*. SSRN. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4896043>

Gibba, Jammeh, & Jallow. (2024). Effect of energy consumption, foreign direct investment, and economic growth on greenhouse gas emissions in OPEC member states: evidence from panel data analysis. *Frontiers in Environmental Science*. <https://doi.org/10.3389/frevc.2024.1428754>.

Goulder, Hafstead, & Dworsky. (2009). *Impacts of Alternative Emissions Allowance Allocation Methods under a Federal Cap-and-Trade Program*. National Bureau of Economic Research (NBER). <https://doi.org/10.3386/w15293>

Guest. (2010). Global Demographic Change, Carbon Emissions, the Optimal Carbon Price and Carbon Abatement. \*\*. <https://doi.org/10.2202/1524-5861.1466>.

Gulli. (2016). *Windfall profits in the EU ETS power sector*. Edward Elgar Publishing. <https://doi.org/10.4337/9781784710620.00016>

Haque. (2023). *Life Cycle Based Carbon Footprint Assessment and Techno-economic Evaluation Methodologies of Hydrogen Energy Systems*. SSRN. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4493411>

Holt, & Shobe. (2015). *Price and Quantity ‘Collars’ for Stabilizing Emissions Allowance Prices: An Experimental Analysis of the EU ETS Market Stability Reserve*. SSRN. <https://doi.org/10.2139/ssrn.2630116>

Hu, Hu, & Wu. (2025). Green Policies, Greener Wallets: How Cap-and-Trade Regulation Affects Cost of Capital. \*\*. <https://doi.org/10.1002/bse.4101>.

Janikowski, Michaliszyn, & Krupanek. (1994). *Joint Implementation Projects between the Netherlands and Poland*. Springer. [https://doi.org/10.1007/978-94-015-8370-1\\_4](https://doi.org/10.1007/978-94-015-8370-1_4)

Kifory. (2025). *Carbon Price Volatility Modeling: A STR-GARCH Approach Applied to the European Carbon Market*. SSRN. <https://doi.org/10.2139/ssrn.5721443>

Kirchner, Schmidt, & Wehrle. (2019). *Exploiting Synergy of Carbon Pricing and other Policy Instruments for Deep Decarbonization*. OSF Preprints. <https://doi.org/10.31224/osf.io/vbq6e>

Kopittke, Dalal, McKenna, Smith, Wang, Weng, Bom, & Menzies. (2024). Soil is a major contributor to global greenhouse gas emissions and climate change. *SOIL*. <https://doi.org/10.5194/soil-10-873-2024>.

Ladaniwskyj. (2008). *Price Dynamics in the European Carbon Market*. SSRN. <https://doi.org/10.2139/ssrn.1494092>

Ledo, Sapkota, & Snapp. (2023). *A Monitoring, Reporting and Verification Framework (Mrv) for Tracking Fertilizer-Induced Nitrous Oxide Emissions*. SSRN. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4449914>

- Li, & Zhao. (2025). *The Effectiveness of Carbon Emission Trading System: Evidence from China's Regional Markets*. SSRN. <https://doi.org/10.2139/ssrn.5012034>
- Mauer, Okullo, & Pahle. (2020). *Postponing Auctioning Versus Cancellation of Allowances in the EU ETS*. SSRN. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3719948>
- Oberthür, & Ott. (1999). *Emission Limitation and Reduction Commitments (Article 3)*. Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-03925-0\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-662-03925-0_11)
- Pearse, & Böhm. (2014). Ten reasons why carbon markets will not bring about radical emissions reduction. \*\*. <https://doi.org/10.1080/17583004.2014.990679>.
- Piga. (2003). Pigouvian Taxation in Tourism. \*\*. <https://doi.org/10.1023/b:eare.00000003544.77701.01>.
- Ramji. (2018). *Paris Agreement and climate change in India*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315212470-14>
- Readiness, & Registries. (2019). *SUPPORTING COUNTRIES WITH DEVELOPMENT OF INFRASTRUCTURE FOR IMPLEMENTATION OF CARBON PRICING INSTRUMENTS*. <https://www.semanticscholar.org/paper/83b70e61527ac2033f801c1b90a8363888c3f159>
- Reid. (2022). *The regression of atmospheric concentration on carbon dioxide emissions*. ESS Open Archive. <https://doi.org/10.1002/essoar.10510796.1>
- Reinaud. (2008). *From Electricity Prices to Electricity Costs: Impact of Emissions Trading on Industry's Electricity Purchasing Strategies*. Edward Elgar Publishing. <https://doi.org/10.4337/9781848445031.00009>
- Richards, & Huebner. (2012). Evaluating protocols and standards for forest carbon-offset programs, Part A: additionality, baselines and permanence. \*\*. <https://doi.org/10.4155/cmt.12.38>.
- Rivers, & Wigle. (2018). *An evaluation of policy options for reducing greenhouse gas emissions in the transport sector: The cost-effectiveness of regulations versus emissions pricing*. <https://www.semanticscholar.org/paper/0b0615bfb4c710e5b1862e4d36610bcd64edc2>

Shei, Liu, & Hsieh. (2024). Distributional effects of carbon pricing: An analysis of income-based versus expenditure-based approaches. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141446>.

Sutter, & Parreño. (2007). Does the current Clean Development Mechanism (CDM) deliver its sustainable development claim? An analysis of officially registered CDM projects. *Climatic Change*. <https://doi.org/10.1007/S10584-007-9269-9>.

Tol. (2001). Equitable cost-benefit analysis of climate change policies. *Environmental and Resource Economics*. [https://doi.org/10.1016/s0921-8009\(00\)00204-4](https://doi.org/10.1016/s0921-8009(00)00204-4).

Weber, & Neuhoﬀ. (2010). *Carbon Markets and Technological Innovation*. SSRN. <https://doi.org/10.2139/ssrn.1333244>

Wei, & Tian. (2013). Building Carbon Emissions Trading System for China under the Experience of EU Emissions Trading System. Trans Tech Publications. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.411-414.2505>

Weishaar. (2014). *Implementation issue 4: Lawsuits following from emissions trading*. Edward Elgar Publishing. <https://doi.org/10.4337/9781781952221.00013>

Wettestad. (2023). *Proactive prevention of carbon leakage? The EU Carbon Border Adjustment Mechanism*. Edward Elgar Publishing. <https://doi.org/10.4337/9781789906981.00029>

Will. (2019). *The eu Emissions Trading System emissions trading system (ets) Leading to Carbon Leakage Effects*. Brill. [https://doi.org/10.1163/9789004391055\\_003](https://doi.org/10.1163/9789004391055_003)

Yan. (2021). The impact of climate policy on fossil fuel consumption: Evidence from the Regional Greenhouse Gas Initiative (RGGI). *Energy Economics*. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105333>.

Yoon, & Karali. (2024). Efficiency in the Early Stages of Carbon Markets: The Case of the Korean Emissions Trading Scheme. \*\*. <https://doi.org/10.1080/1540496X.2024.2379460>.