

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

KI-generiertes akademisches Thesis-Showcase

Academic Thesis AI (Multi-Agenten-System)

Januar 2025

Table of Contents

| | |
|---|-----------|
| Abstract | 1 |
| Einleitung | 3 |
| 2. Literaturübersicht | 3 |
| 2.1 Geschichte des Emissionshandels und internationale Abkommen | 4 |
| 2.1.1 <i>Das Kyoto-Protokoll und seine Mechanismen</i> | 5 |
| 2.1.2 <i>Die Entstehung und Entwicklung des Europäischen Emissionshandelssystems (EU ETS)</i> | 6 |
| 2.2 Theoretische Grundlagen der Umweltökonomie und CO ₂ -Bepreisung | 10 |
| 2.2.1 <i>Ökonomische Externalitäten und Marktversagen</i> | 10 |
| 2.2.2 <i>Pigou-Steuern und Emissionshandel als Korrekturinstrumente</i> | 11 |
| 2.2.3 <i>Das Coase-Theorem und die Allokation von Eigentumsrechten</i> | 12 |
| 2.3 CO ₂ -Preismechanismen und ihre Rolle im Klimaschutz | 13 |
| 2.3.1 <i>Überblick über verschiedene Preismechanismen: Steuern vs. Handel</i> | 14 |
| 2.3.2 <i>Implementierungsstrategien und Designelemente</i> | 15 |
| 2.3.3 <i>Die Bedeutung der CO₂-Bepreisung für die Dekarbonisierung</i> | 17 |
| 2.4 Empirische Studien zur Wirksamkeit von CO ₂ -Preismechanismen | 18 |
| 2.4.1 <i>Reduktion von Treibhausgasemissionen</i> | 19 |
| 2.4.2 <i>Auswirkungen auf Wirtschaft und Wettbewerbsfähigkeit</i> | 20 |
| 2.4.3 <i>Innovation und technologischer Wandel</i> | 22 |
| 2.5 Kritische Perspektiven und Herausforderungen der CO ₂ -Bepreisung | 24 |
| 2.5.1 <i>Carbon Leakage und Wettbewerbsnachteile</i> | 24 |
| 2.5.2 <i>Verteilungswirkungen und soziale Akzeptanz</i> | 25 |
| 2.5.3 <i>Politische Umsetzbarkeit und Governance-Fragen</i> | 27 |
| 2.5.4 <i>Die Rolle von Komplementärmaßnahmen</i> | 28 |
| Methodik | 30 |

| | |
|---|-----------|
| 2.1 Analyserahmen für die Klimaschutzwirkung | 31 |
| 2.2 Auswahlkriterien für Fallstudien | 33 |
| 2.3 Datenquellen und Messverfahren | 35 |
| 2.4 Statistische Methoden zur Wirksamkeitsanalyse | 38 |
| Analyse | 40 |
| Emissionsreduktionen durch CO2-Handel | 41 |
| Preisgestaltung und Marktmechanismen | 45 |
| Fallstudien | 50 |
| EU Emissionshandelssystem (EU ETS) | 50 |
| Kalifornisches Cap-and-Trade-Programm | 53 |
| Chinesisches Emissionshandelssystem | 55 |
| Vergleich mit anderen Klimaschutzinstrumenten | 56 |
| Emissionshandel vs. CO2-Steuer | 57 |
| Ordnungsrechtliche Vorschriften (Command-and-Control) | 60 |
| Subventionen und Förderprogramme | 61 |
| Freiwillige Vereinbarungen | 62 |
| Empirische Belege für Klimaschutzwirkung | 63 |
| Diskussion | 67 |
| Implikationen für die Klimapolitik | 68 |
| Grenzen und Herausforderungen des Emissionshandels | 70 |
| Verbesserungsvorschläge für CO2-Märkte | 71 |
| Rolle im globalen Klimaschutz | 73 |
| Empfehlungen für Politik und Wirtschaft | 75 |
| Einschränkungen | 77 |
| Methodische Einschränkungen | 78 |
| Umfang und Generalisierbarkeit | 78 |

| | |
|--|-----------|
| Zeitliche und Kontextuelle Beschränkungen | 79 |
| Theoretische und Konzeptionelle Einschränkungen | 80 |
| Zukünftige Forschungsrichtungen | 80 |
| 1. Empirische Validierung und groß angelegte Tests von Reformen | 81 |
| 2. Sektorale Integration und maßgeschneiderte Ansätze | 81 |
| 3. Interaktion von CO ₂ -Bepreisung und Komplementärmaßnahmen | 82 |
| 4. Verteilungswirkungen und soziale Gerechtigkeit | 82 |
| 5. Internationale Koordination und globale Kohlenstoffmärkte | 83 |
| 6. Politische Ökonomie und Governance | 83 |
| 7. Digitale Technologien und MRV-Systeme | 83 |
| Fazit | 84 |
| Anhang A: Detaillierter Rahmen für die Wirkungsanalyse von CO ₂ -Preissystemen | 89 |
| A.1 Theoretische Fundierung des Wirkungsmodells | 89 |
| A.2 Wirkungsmechanismen und Effekte | 90 |
| A.3 Validierungskriterien und Messgrößen | 91 |
| Anhang C: Detaillierte Fallstudien-Prognosen | 92 |
| C.1 Szenario 1: EU ETS - Auswirkungen einer verschärften Cap-Reduktion . | 92 |
| C.2 Szenario 2: Kalifornisches ETS - Auswirkungen einer erfolgreichen Linkage-Erweiterung | 94 |
| C.3 Cross-Szenario Vergleich und Implikationen | 96 |
| Anhang D: Zusätzliche Referenzen und Ressourcen | 97 |
| D.1 Grundlagentexte und Übersichtsartikel | 97 |
| D.2 Schlüsselberichte und Policy-Analysen | 98 |
| D.3 Online-Ressourcen und Datenbanken | 99 |
| D.4 Software/Tools für Emissionshandel-Modellierung | 100 |
| D.5 Professionelle Organisationen und Think Tanks | 100 |
| Anhang E: Glossar von Begriffen | 101 |

References 106

Abstract

Forschungsproblem und Ansatz: Der Klimawandel stellt eine der größten Herausforderungen des 21. Jahrhunderts dar, die eine dringende und effektive Dekarbonisierung der Weltwirtschaft erfordert. Diese Arbeit untersucht kritisch, inwiefern der Handel mit CO₂-Zertifikaten, ein marktbasiertes Instrument zur CO₂-Bepreisung, nachweislich zu einer signifikanten Verlangsamung des menschengemachten Klimawandels beiträgt. Dabei wird die zentrale Frage beleuchtet, ob die theoretisch postulierten Effizienzvorteile in der Praxis zu messbaren Emissionsreduktionen führen und welche Faktoren ihre Wirksamkeit beeinflussen.

Methodologie und Erkenntnisse: Die Untersuchung basiert auf einer umfassenden Literaturanalyse und der vergleichenden Untersuchung etablierter Emissionshandelssysteme (EHS) wie dem EU ETS, dem kalifornischen Cap-and-Trade-Programm und dem chinesischen nationalen EHS. Die Analyse zeigt, dass CO₂-Märkte unter bestimmten Designbedingungen, insbesondere einem ambitionierten Cap und robusten Marktstabilisierungsmechanismen, nachweislich zu Emissionsreduktionen beitragen können. Die empirischen Belege unterstreichen die Fähigkeit dieser Systeme, Anreize für technologische Innovationen und einen Brennstoffwechsel zu schaffen, wobei die Wirksamkeit stark von der politischen Gestaltung, der Marktliquidität und der Akzeptanz abhängt.

Schlüsselbeiträge: 1. Systematische Aufarbeitung der Entwicklung und der theoretischen Grundlagen von CO₂-Preismechanismen. 2. Detaillierte vergleichende Analyse der Designelemente und der empirischen Wirkung führender Emissionshandelssysteme. 3. Identifizierung kritischer Herausforderungen und konkreter Verbesserungsvorschläge für die Optimierung zukünftiger CO₂-Märkte.

Implikationen: Die Ergebnisse sind relevant für politische Entscheidungsträger, die effektive Klimaschutzstrategien entwickeln, sowie für Unternehmen, die ihre Dekarbonisierungsanstrengungen planen. Sie betonen die Notwendigkeit eines kohärenten Politik-

mixes, der neben der CO₂-Bepreisung auch Komplementärmaßnahmen zur Förderung von Innovation und zur Gewährleistung sozialer Gerechtigkeit umfasst. Zukünftige Anstrengungen müssen sich auf die internationale Harmonisierung und die Anpassung an neue Sektoren konzentrieren, um die globalen Klimaziele effizient zu erreichen.

Schlagwörter: CO₂-Zertifikatehandel, Emissionshandelssysteme, Klimawandel, Dekarbonisierung, CO₂-Bepreisung, EU ETS, Carbon Leakage, Marktmechanismen, Klimapolitik, technologische Innovation, Umweltökonomie, Cap-and-Trade, Nachhaltigkeit, Klimaziele, internationale Abkommen

Einleitung

Der Klimawandel ist zweifellos eine der größten Herausforderungen des 21. Jahrhunderts. Er ist komplex, drängend und bedroht unseren Planeten in vielerlei Hinsicht (Rao et al., 2023). Die Wissenschaft ist sich einig: Die globale Erwärmung, die wir heute sehen, ist hauptsächlich vom Menschen verursacht. Diese Emissionen stammen aus dem Verbrennen fossiler Brennstoffe, Industrieprozessen und Landnutzungsänderungen (Timilsina, 2018). Die Folgen spüren wir schon heute deutlich. Extreme Wetterereignisse nehmen zu, der Meeresspiegel steigt, die Ozeane versauern und die Biodiversität schwindet (Rao et al., 2023)(Digitomie & Ekemezie, 2024). All das beeinflusst unsere Ökosysteme, die menschliche Gesundheit, die Nahrungsmittelsicherheit – und die wirtschaftliche Entwicklung. Angesichts dieser Dringlichkeit haben sich die meisten Länder der Welt im Pariser Abkommen verpflichtet: Die globale Erwärmung soll deutlich unter 2°C über vorindustriellem Niveau gehalten werden, möglichst sogar auf 1,5°C. Dieses Ziel verlangt einen grundlegenden Wandel unserer globalen Energie- und Wirtschaftssysteme. Wir müssen weg von kohlenstoffintensiven hin zu nachhaltigen und emissionsarmen Praktiken (Timilsina, 2018). Deshalb ist es entscheidend, wirksame klimapolitische Instrumente zu entwickeln und umzusetzen. Nur so lassen sich die notwendige Dekarbonisierung vorantreiben und die Klimaziele erreichen.

In diesem Kontext sind marktwirtschaftliche Instrumente zur CO₂-Bepreisung, insbesondere der Emissionshandel, weltweit immer wichtiger geworden (Haïtes et al., 2018)(Lysunets, 2023). Der CO₂-Zertifikatehandel, oft auch als Cap-and-Trade-System bekannt, versucht, die externen Kosten von Treibhausgasemissionen zu internalisieren. Er setzt einen Preis auf Kohl...

2. Literaturübersicht

Die globale Herausforderung des Klimawandels erfordert umfassende und effektive politische Maßnahmen, um den Anstieg der Treibhausgasemissionen zu bremsen und

langfristig umzukehren. Unter den verschiedenen Ansätzen zur Klimaminderung hat sich die CO₂-Bepreisung, sei es in Form von Emissionshandelssystemen oder Kohlenstoffsteuern, als ein zentrales Instrument der Umweltpolitik etabliert (Hailes et al., 2018)(Timilsina, 2018). Die vorliegende Literaturübersicht zielt darauf ab, ein fundiertes Verständnis der Entwicklung, der theoretischen Grundlagen, der Implementierung, der empirischen Wirksamkeit und der kritischen Herausforderungen von CO₂-Preismechanismen zu vermitteln. Sie beleuchtet die historische Entwicklung des Emissionshandels, beginnend mit dem Kyoto-Protokoll und der Etablierung des Europäischen Emissionshandelssystems (EU ETS), und untersucht die zugrunde liegenden umweltökonomischen Prinzipien. Weiterhin werden die verschiedenen Mechanismen der CO₂-Bepreisung im Kontext des Klimaschutzes diskutiert, gefolgt von einer Analyse empirischer Studien, die deren Effektivität in Bezug auf Emissionsreduktion, wirtschaftliche Auswirkungen und Innovationsförderung bewerten. Abschließend werden kritische Perspektiven und Herausforderungen wie Carbon Leakage, Verteilungswirkungen und Governance-Fragen beleuchtet, um ein umfassendes Bild dieses komplexen Politikfeldes zu zeichnen. Die Synthese der bestehenden Forschung dient als Grundlage für das Verständnis der Potenziale und Grenzen der CO₂-Bepreisung als Instrument zur Erreichung globaler Klimaziele.

2.1 Geschichte des Emissionshandels und internationale Abkommen

Die Idee, Umweltgüter über Marktmechanismen zu steuern, ist nicht neu, erlangte jedoch im Kontext des Klimawandels und internationaler Verhandlungen eine besondere Prominenz. Die Geschichte des Emissionshandels ist eng mit dem wachsenden Bewusstsein für globale Umweltprobleme und dem Bestreben verbunden, diese durch effiziente, marktwirtschaftliche Instrumente zu adressieren (Black, 2018). Die Entwicklung von Kohlenstoffmärkten ist ein Ergebnis jahrzehntelanger internationaler Bemühungen, kollektive Lösungen für eine kollektive Herausforderung zu finden. Diese Entwicklung spiegelt auch ein grundlegendes Umdenken in der Umweltpolitik wider, weg von reinen Geboten und Ver-

boten hin zu Anreizsystemen, die ökonomische Effizienz mit ökologischen Zielen verbinden (Gronwald & Ketterer, 2009).

2.1.1 Das Kyoto-Protokoll und seine Mechanismen

Ein entscheidender Wendepunkt in der internationalen Klimapolitik war die Verabschiedung des Kyoto-Protokolls im Jahr 1997, das als erstes völkerrechtlich verbindliches Abkommen Emissionsreduktionsziele für Industrieländer festlegte (Black, 2018). Das Protokoll basierte auf dem Prinzip der “gemeinsamen, aber differenzierten Verantwortlichkeiten” und erkannte an, dass Industrieländer aufgrund ihrer historischen Emissionen eine größere Verantwortung trugen. Um die Kosten der Emissionsreduktion zu minimieren und die Flexibilität der Vertragsparteien zu erhöhen, führte das Kyoto-Protokoll drei sogenannte “flexible Mechanismen” ein: den Emissionshandel (Emission Trading, ET), den Mechanismus für umweltverträgliche Entwicklung (Clean Development Mechanism, CDM) und die gemeinsame Umsetzung (Joint Implementation, JI) (Black, 2018)(Waldegren, 2012).

Der Emissionshandel ermöglichte es Ländern, die ihre Reduktionsziele übertrafen, überschüssige Emissionsrechte an Länder zu verkaufen, die Schwierigkeiten hatten, ihre Ziele zu erreichen (Black, 2018). Dieses Konzept zielte darauf ab, die Reduktionen dort zu realisieren, wo sie am kostengünstigsten waren, und somit die globale Effizienz der Klimaschutzbemühungen zu steigern. Der CDM erlaubte es Industrieländern, Emissionsreduktionen in Entwicklungsländern durch Investitionen in Klimaschutzprojekte zu erzielen und sich diese als Emissionsgutschriften (Certified Emission Reductions, CERs) anrechnen zu lassen (Waldegren, 2012). Dies sollte nicht nur den Industrieländern helfen, ihre Ziele zu erreichen, sondern auch nachhaltige Entwicklung in den Gastgeberländern fördern. Die JI ähnelte dem CDM, konzentrierte sich jedoch auf Projekte zwischen Industrieländern und Ländern mit Transformationswirtschaften, wobei die Gutschriften als Emission Reduction Units (ERUs) bezeichnet wurden (Black, 2018).

Obwohl das Kyoto-Protokoll einen wegweisenden Schritt darstellte und die Grundlage für internationale Kohlenstoffmärkte legte, war seine Wirksamkeit Gegenstand intensiver Debatten. Kritiker bemängelten die begrenzte Beteiligung großer Emittenten wie den Vereinigten Staaten, die das Protokoll nicht ratifizierten, und die oft komplexen und bürokratischen Regeln der flexiblen Mechanismen (Black, 2018). Insbesondere der CDM wurde für Probleme wie Additionality (die Frage, ob die Reduktionen tatsächlich zusätzlich zu dem wären, was ohnehin geschehen wäre) und die Qualität der generierten Gutschriften kritisiert (Salzman & Weisbach, 2024). Trotz dieser Herausforderungen bot das Kyoto-Protokoll wertvolle Lernerfahrungen und demonstrierte das Potenzial von marktgestützten Instrumenten im globalen Klimaschutz. Es etablierte das Prinzip der handelbaren Emissionsrechte und legte den Grundstein für nachfolgende regionale und nationale Emissionshandelssysteme (Black, 2018). Die Erfahrungen aus Kyoto zeigten, dass die Gestaltung und Governance solcher Märkte entscheidend für ihren Erfolg sind und dass eine robuste Überwachung und Verifizierung unerlässlich sind, um die Integrität der Reduktionsbemühungen zu gewährleisten (Waldegren, 2012).

2.1.2 Die Entstehung und Entwicklung des Europäischen Emissionshandelssystems (EU ETS)

Aus den Erfahrungen des Kyoto-Protokolls und dem wachsenden Bewusstsein für die Notwendigkeit einer effektiven Klimapolitik innerhalb der Europäischen Union entstand das Europäische Emissionshandelssystem (EU ETS), das 2005 in Kraft trat (Egenhofer et al., 2011). Das EU ETS ist das weltweit größte und erste internationale Emissionshandelssystem für Treibhausgase und deckt über 40% der EU-Gesamtemissionen ab, hauptsächlich aus den Sektoren Energieerzeugung, energieintensive Industrie und kommerzieller Luftverkehr (Klimko & Hasprová, 2025)(Egenhofer et al., 2011). Es wurde als Eckpfeiler der EU-Klimapolitik konzipiert, um die EU-weiten Emissionsreduktionsziele auf kosteneffiziente Weise zu erreichen (Egenhofer et al., 2011).

Das System funktioniert nach dem “Cap-and-Trade”-Prinzip: Eine Obergrenze (Cap) wird für die Gesamtmenge der von den erfassten Anlagen emittierten Treibhausgase festgelegt. Diese Obergrenze wird im Laufe der Zeit reduziert, um die Emissionen zu senken. Innerhalb dieser Obergrenze erhalten oder kaufen Unternehmen Emissionszertifikate, die jeweils die Emission einer Tonne CO₂-Äquivalent erlauben (Kim, 2021). Unternehmen können diese Zertifikate untereinander handeln, was einen Preis für CO₂-Emissionen schafft. Firmen, die ihre Emissionen kostengünstig reduzieren können, verkaufen überschüssige Zertifikate, während Firmen mit höheren Reduktionskosten zusätzliche Zertifikate kaufen können (Egenhofer et al., 2011). Dies fördert Investitionen in emissionsarme Technologien und Energieeffizienzmaßnahmen dort, wo sie am wirtschaftlichsten sind (Kim, 2021).

Die Geschichte des EU ETS lässt sich in mehrere Phasen unterteilen, die jeweils auf den Erfahrungen der vorhergehenden aufbauten und Anpassungen vornahmen, um die Wirksamkeit und Robustheit des Systems zu verbessern (Kim, 2021):

- **Phase 1 (2005-2007): Die Lernphase.** Diese Pilotphase diente dazu, Erfahrungen mit dem Handelssystem zu sammeln. Die Zertifikate wurden größtenteils kostenlos zugeteilt, basierend auf historischen Emissionen. Ein Hauptproblem dieser Phase war die Überallokation von Zertifikaten, die zu einem Preisverfall führte und die Anreizwirkung minderte (Clò, 2011). Die nationalen Allokationspläne (NAPs) führten zu unterschiedlichen Regeln und erschwerten die Harmonisierung.
- **Phase 2 (2008-2012): Anpassung an das Kyoto-Protokoll.** Diese Phase fiel mit der ersten Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls zusammen. Die Allokation wurde teilweise korrigiert, aber eine erneute Überallokation aufgrund der Finanzkrise von 2008 führte erneut zu einem Preisverfall (Clò, 2011). Die Integration von CDM/JI-Gutschriften in das System bot Flexibilität, wurde aber auch kritisch beäugt (Waldegren, 2012).
- **Phase 3 (2013-2020): Reformen und Harmonisierung.** Diese Phase brachte bedeutende Reformen mit sich. Es wurde ein EU-weiter Cap eingeführt, der jährlich um

1,74% sank. Ein größerer Anteil der Zertifikate wurde versteigert, und die Allokation erfolgte auf EU-Ebene nach harmonisierten Regeln (Kim, 2021). Trotz dieser Reformen blieb der CO₂-Preis aufgrund des Überangebots niedrig, was die Notwendigkeit weiterer Strukturanpassungen aufzeigte (Healy et al., 2018). Die Diskussion um Carbon Leakage, also die Verlagerung von Emissionen und Produktion in Länder mit weniger strengen Klimaschutzauflagen, wurde in dieser Phase besonders prominent und führte zu Sonderregeln für energieintensive Industrien (Healy et al., 2018).

- **Phase 4 (2021-2030): Ambition und Stabilität.** Mit dem EU Green Deal und den verschärften Klimazielen für 2030 (mindestens 55% Reduktion gegenüber 1990) wurde das EU ETS erneut reformiert. Der jährliche Reduktionsfaktor des Caps wurde auf 2,2% erhöht (Klimko & Hasprová, 2025). Der Marktstabilitätsreserve (MSR), die 2019 eingeführt wurde, kam eine größere Bedeutung zu, um das Überangebot an Zertifikaten zu steuern und Preisschwankungen abzufedern (Holt & Shobe, 2016). Die MSR entzieht überschüssige Zertifikate dem Markt und führt sie bei Bedarf wieder zu, um ein stabiles Preisniveau zu gewährleisten (Kim, 2021). Zudem wurde die Ausweitung des EU ETS auf den Schiffsverkehr beschlossen, und es gibt Pläne zur Bepreisung von Emissionen aus Gebäuden und dem Straßenverkehr in einem separaten System (ETS 2) (Falanga et al., 2025). Auch die Einführung eines CO₂-Grenzausgleichsmechanismus (Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM) ist Teil dieser Phase, um Carbon Leakage entgegenzuwirken und gleiche Wettbewerbsbedingungen zu schaffen (Lysunets, 2023)(Yang et al., 2024).

Das EU ETS hat sich im Laufe seiner Entwicklung zu einem komplexen und dynamischen Instrument entwickelt, das sowohl Erfolge bei der Emissionsreduktion als auch erhebliche Herausforderungen in Bezug auf Preisstabilität, Carbon Leakage und die gerechte Verteilung der Lasten aufweist (Klimko & Hasprová, 2025)(Healy et al., 2018). Die fortlaufenden Reformen zeigen das Bestreben, das System an neue Klimaziele und sich ändernde wirtschaftliche Rahmenbedingungen anzupassen und seine Rolle als führendes Instrument der

Klimapolitik zu festigen. Die Erfahrungen aus dem EU ETS bieten wertvolle Einblicke für andere Regionen und Länder, die ähnliche Mechanismen einführen möchten (Upston-Hooper & Swartz, 2013).

Tabelle 1: Überblick über die Phasen des EU Emissionshandelssystems (EU ETS)

| | Phase 1 | Phase 2 | Phase 3 | Phase 4 |
|----------------------|-----------------------|--------------------------------|-------------------------------------|--|
| Merkmal | (2005-2007) | (2008-2012) | (2013-2020) | (2021-2030) |
| Hauptziel | Lernphase | Kyoto- Anpassung | Reform & Harmonisierung | Ambition & Stabilität |
| Cap-Reduktion | Flexibel, national | Flexibel, national | EU-weit, -1,74%/Jahr | EU-weit, -2,2% (später 4,3%)/Jahr |
| Allokation | Primär kostenlos | Primär kostenlos | Zunehmend Auktion | Überwiegend Auktion |
| Sektoren | Energie, Industrie | Energie, Industrie | Energie, Industrie, Luftfahrt | Energie, Industrie, Luftfahrt, Seeverkehr, (ab 2027: Gebäude, Straßenverkehr) |
| Hauptproblem | Überallokation | Überallokation, Finanzkrise | Niedriger Preis, Carbon Leakage | Hoher Preis, soziale Akzeptanz |
| Wichtigste Reform | — | — | EU-weites Cap, MSR | Erhöhtes Cap, ETS2, CBAM |

Anmerkung: Die Tabelle fasst die wesentlichen Designmerkmale und Entwicklungen der vier Phasen des EU ETS zusammen, um einen schnellen Überblick über die Systemevolution zu geben.

2.2 Theoretische Grundlagen der Umweltökonomie und CO₂-Bepreisung

Die CO₂-Bepreisung ist tief in den Prinzipien der Umweltökonomie verwurzelt, einer Disziplin, die sich mit der Beziehung zwischen Wirtschaft und Umwelt befasst und nach Wegen sucht, Umweltschutzziele auf effiziente Weise zu erreichen (Gronwald & Ketterer, 2009). Die Notwendigkeit der Bepreisung von Umweltgütern ergibt sich aus dem Konzept der Externalitäten und dem damit verbundenen Marktversagen.

2.2.1 Ökonomische Externalitäten und Marktversagen

Im Kern der Umweltökonomie steht das Konzept der Externalitäten. Eine Externalität tritt auf, wenn die Produktion oder der Konsum eines Gutes direkte Auswirkungen auf Dritte hat, die nicht am Markttransaktionsprozess beteiligt sind und für diese Auswirkungen weder entschädigt werden noch dafür bezahlen (Gronwald & Ketterer, 2009). Im Falle von CO₂-Emissionen handelt es sich um eine negative Externalität. Die Emission von Treibhausgasen durch Industrie, Verkehr oder Haushalte schädigt die Umwelt und die Gesellschaft durch Klimawandelfolgen wie Extremwetterereignisse, Meeresspiegelanstieg oder Artensterben (Rao et al., 2023). Diese Kosten – die sogenannten externen Kosten – werden jedoch nicht vom Emittenten getragen, sondern von der Allgemeinheit (Gronwald & Ketterer, 2009).

Das Problem des Marktversagens entsteht, weil der Marktmechanismus, der normalerweise Ressourcen effizient allokiert, die externen Kosten nicht internalisiert. Der Preis für Güter und Dienstleistungen, deren Produktion mit Emissionen verbunden ist, spiegelt nicht die wahren gesellschaftlichen Kosten wider. Dies führt dazu, dass zu viele emissionsintensive Güter produziert und konsumiert werden, da die Emittenten keine Anreize haben, ihre

Emissionen zu reduzieren, solange sie die Kosten nicht tragen (Gronwald & Ketterer, 2009). Ohne eine Korrektur durch staatliche Eingriffe oder andere Mechanismen wird der Markt daher zu einer suboptimalen Allokation von Ressourcen führen, bei der die Umwelt übermäßig belastet wird. Die Herausforderung besteht darin, einen Mechanismus zu finden, der die externen Kosten der Emissionen in die wirtschaftlichen Entscheidungen der Akteure einbezieht und somit eine effizientere Allokation von Ressourcen im Sinne des Umweltschutzes ermöglicht (Gronwald & Ketterer, 2009)(Ekardt & Hennig, 2011).

2.2.2 Pigou-Steuern und Emissionshandel als Korrekturinstrumente

Zur Korrektur von negativen Externalitäten schlug der Ökonom Arthur C. Pigou im frühen 20. Jahrhundert die Einführung von Steuern vor, die genau der Höhe der externen Kosten entsprechen (Gronwald & Ketterer, 2009). Eine solche Pigou-Steuer auf CO₂-Emissionen würde den Emittenten dazu zwingen, für jede emittierte Tonne CO₂ zu bezahlen, wodurch die externen Kosten internalisiert würden. Der Preis emissionsintensiver Güter würde steigen, was Konsumenten und Produzenten Anreize gäbe, ihren CO₂-Fußabdruck zu reduzieren (Hautes et al., 2018)(Timilsina, 2018). Der Vorteil einer Pigou-Steuer liegt in ihrer Einfachheit und der Preissicherheit für die Unternehmen. Sie wissen genau, wie viel eine Tonne CO₂ kostet, und können ihre Investitionsentscheidungen entsprechend anpassen. Die Einnahmen aus der Steuer könnten zudem für andere öffentliche Zwecke oder zur Entlastung der Bürger verwendet werden (Ohlendorf et al., 2020).

Ein alternatives marktwirtschaftliches Instrument zur Internalisierung externer Kosten ist der Emissionshandel, wie er im Kyoto-Protokoll und dem EU ETS implementiert wurde (Egenhofer et al., 2011)(Gronwald & Ketterer, 2009). Während eine Pigou-Steuer den Preis für Emissionen festlegt und die Menge variabel lässt, legt der Emissionshandel eine Obergrenze (Cap) für die Gesamtmenge der Emissionen fest und lässt den Preis variabel (Holt & Shobe, 2016). Die Regierung gibt eine bestimmte Anzahl von Emissionsrechten (Zertifikaten) aus, die handelbar sind. Unternehmen müssen für jede emittierte Einheit

CO₂ ein Zertifikat abgeben. Da die Gesamtzahl der Zertifikate begrenzt ist, entsteht ein Marktpreis für Emissionen. Unternehmen, die ihre Emissionen kostengünstiger reduzieren können, verkaufen überschüssige Zertifikate, während Unternehmen mit höheren Reduktionskosten Zertifikate kaufen (Gronwald & Ketterer, 2009). Dies führt zu einer effizienten Allokation der Reduktionslast, da die Reduktionen dort stattfinden, wo sie am günstigsten sind (Gronwald & Ketterer, 2009)(Weiqi et al., 2018).

Der Hauptunterschied zwischen Pigou-Steuern und Emissionshandel liegt in der Steuerung von Preis und Menge (Holt & Shobe, 2016). Eine Steuer bietet Preissicherheit, aber die Emissionsmenge ist ungewiss. Ein Handelssystem bietet Mengensicherheit (das Cap wird eingehalten), aber der Preis ist volatil (Holt & Shobe, 2016). Die Wahl zwischen diesen Instrumenten hängt von verschiedenen Faktoren ab, darunter die Präferenz für Preis- oder Mengensicherheit, die administrative Umsetzbarkeit und die politische Akzeptanz (Timilsina, 2018). Beide Instrumente haben das gemeinsame Ziel, einen Preis auf CO₂-Emissionen zu setzen und so Anreize für emissionsminderndes Verhalten zu schaffen, was in der Umweltökonomie als “Internalisierung externer Kosten” bezeichnet wird.

2.2.3 Das Coase-Theorem und die Allokation von Eigentumsrechten

Das Coase-Theorem, formuliert vom Nobelpreisträger Ronald Coase, bietet eine weitere wichtige theoretische Perspektive auf die Lösung von Externalitätenproblemen (Gronwald & Ketterer, 2009). Es besagt, dass, wenn Eigentumsrechte klar definiert sind und Transaktionskosten null oder vernachlässigbar sind, die Parteien durch Verhandlungen zu einer effizienten Allokation von Ressourcen gelangen können, unabhängig davon, wie die Eigentumsrechte ursprünglich zugewiesen wurden. Im Kontext von Umweltproblemen bedeutet dies, dass, wenn klar ist, wer das Recht hat zu emittieren oder wer das Recht auf saubere Luft hat, und wenn die Parteien ohne Kosten miteinander verhandeln können, sie zu einer optimalen Lösung für das Emissionsproblem gelangen werden (Gronwald & Ketterer, 2009).

Für die CO₂-Bepreisung ist das Coase-Theorem insofern relevant, als es die Bedeutung der Definition von Eigentumsrechten an der Atmosphäre oder an Emissionskapazitäten hervorhebt. Ein Emissionshandelssystem kann als eine praktische Anwendung des Coase-Theorems verstanden werden: Die Regierung definiert ein Eigentumsrecht an der Atmosphäre, indem sie eine begrenzte Anzahl von Emissionszertifikaten ausgibt. Diese Zertifikate repräsentieren das Recht, eine bestimmte Menge CO₂ zu emittieren. Durch den Handel mit diesen Rechten können die Unternehmen (die Emittenten) und potenziell auch andere Akteure (die die Rechte erwerben könnten, um sie stillzulegen) die effizienteste Verteilung der Emissionsreduktionen aushandeln (Weiqi et al., 2018).

Während die Annahme von null Transaktionskosten in der Realität selten zutrifft, unterstreicht das Coase-Theorem die Bedeutung von klaren Regeln und geringen Marktreibungen für die Effizienz von marktbasierten Instrumenten. Hohe Transaktionskosten, Informationsasymmetrien oder unklare Eigentumsrechte können die Funktionsweise eines Emissionshandelssystems beeinträchtigen (Herman, 2024). Daher ist die sorgfältige Gestaltung der Marktregeln, die Schaffung von Transparenz und die Reduzierung bürokratischer Hürden entscheidend, um die theoretischen Effizienzvorteile in der Praxis zu realisieren (Kim, 2021). Das Theorem liefert somit eine theoretische Rechtfertigung für die Schaffung von Märkten für Umweltgüter und betont die Rolle von Institutionen bei der Ermöglichung effizienter Lösungen für Umweltprobleme.

2.3 CO₂-Preismechanismen und ihre Rolle im Klimaschutz

Die Einführung eines Preises für CO₂-Emissionen wird weithin als eines der effektivsten und effizientesten Instrumente zur Minderung des Klimawandels angesehen (Haites et al., 2018)(Timilsina, 2018). Durch die Internalisierung der externen Kosten von Emissionen in die wirtschaftlichen Entscheidungen von Unternehmen und Haushalten schaffen CO₂-Preismechanismen Anreize für die Reduzierung von Treibhausgasen. Ihre Rolle im Kli-

maschutz ist vielschichtig und umfasst die direkte Emissionsreduktion, die Förderung von Innovationen und die Schaffung von Einnahmen für weitere Klimaschutzmaßnahmen.

2.3.1 Überblick über verschiedene Preismechanismen: Steuern vs. Handel

Wie bereits in den theoretischen Grundlagen erörtert, gibt es primär zwei Hauptformen der CO₂-Bepreisung: Kohlenstoffsteuern und Emissionshandelssysteme. Beide Ansätze haben das gemeinsame Ziel, einen Preis auf Emissionen zu setzen, unterscheiden sich jedoch in ihrer Funktionsweise und ihren Implikationen (Timilsina, 2018).

Kohlenstoffsteuern (Carbon Taxes) sind direkte Abgaben auf den Kohlenstoffgehalt von Brennstoffen oder auf die Menge der emittierten CO₂-Äquivalente (Haites et al., 2018). Der Preis pro Tonne CO₂ wird von der Regierung festgelegt und ist für die Marktteilnehmer konstant. Dies bietet Preissicherheit für Unternehmen und Haushalte, was Investitionsentscheidungen erleichtern kann (Haites et al., 2018). Länder wie Schweden, Finnland oder die Schweiz haben erfolgreich Kohlenstoffsteuern implementiert, die zu erheblichen Emissionsreduktionen beigetragen haben (Haites et al., 2018)(Batini et al., 2020). Die Einnahmen aus Kohlenstoffsteuern können für verschiedene Zwecke verwendet werden, z.B. zur Senkung anderer Steuern (Steuerneutralität), zur Finanzierung von Klimaschutzprojekten oder zur Unterstützung von Haushalten mit niedrigem Einkommen, um die sozialen Auswirkungen abzufedern (Ohlendorf et al., 2020). Ein potenzieller Nachteil ist die Unsicherheit über die tatsächlich erzielte Emissionsreduktionsmenge, da diese von der Preiselastizität der Nachfrage abhängt (Holt & Shobe, 2021).

Emissionshandelssysteme (Emission Trading Systems, ETS), auch bekannt als Cap-and-Trade-Systeme, legen eine Obergrenze (Cap) für die Gesamtemissionen fest und verteilen oder versteigern Emissionsrechte, die von den Emittenten gehandelt werden können (Egenhofer et al., 2011). Hier ist die Menge der Emissionen festgelegt, während der Preis durch Angebot und Nachfrage auf dem Markt bestimmt wird und somit volatil sein kann (Holt & Shobe, 2016). Das EU ETS ist das prominenteste Beispiel für ein solches System,

aber auch in anderen Regionen wie Kalifornien, Québec, Südkorea und China wurden ETS implementiert oder befinden sich in der Entwicklung (Upston-Hooper & Swartz, 2013)(Wei et al., 2024)(Hu et al., 2022). Der Hauptvorteil eines ETS ist die Gewissheit, dass das Emissionsziel (Cap) erreicht wird, sofern das System gut gestaltet und durchgesetzt wird (Kim, 2021). Die Preisschwankungen können jedoch Unsicherheit für Investitionen schaffen und erfordern Mechanismen wie die Marktstabilitätsreserve im EU ETS, um extreme Volatilität zu dämpfen (Holt & Shobe, 2016).

Neben diesen beiden Hauptmechanismen gibt es auch Hybridansätze, die Elemente von Steuern und Handel kombinieren, wie z.B. Preisober- und -untergrenzen (Price Collars) in ETS, die die Preisvolatilität innerhalb eines bestimmten Korridors halten sollen (Holt & Shobe, 2016). Die Wahl des geeigneten Mechanismus hängt von nationalen Gegebenheiten, politischen Präferenzen und den spezifischen Klimazielen ab (Timilsina, 2018). Beide Ansätze sind jedoch entscheidend, um die Kosten der externen Effekte zu internalisieren und somit Anreize für eine kohlenstoffarme Wirtschaft zu schaffen (Digitomie & Ekemezie, 2024).

2.3.2 Implementierungsstrategien und Designelemente

Die effektive Implementierung von CO₂-Preismechanismen erfordert eine sorgfältige Gestaltung verschiedener Designelemente, die maßgeblich über Erfolg oder Misserfolg entscheiden können (Kim, 2021).

Ein zentrales Designelement ist die **Festlegung des Preises oder der Menge**. Bei Kohlenstoffsteuern muss der Steuersatz initial festgelegt werden, oft mit der Möglichkeit einer schrittweisen Erhöhung (Haite et al., 2018). Bei Emissionshandelssystemen ist die Festlegung des Caps, also der Obergrenze der Emissionen, von entscheidender Bedeutung. Ein zu hohes Cap führt zu einem Überangebot an Zertifikaten und einem niedrigen Preis, wodurch die Anreizwirkung verloren geht (Clò, 2011). Ein zu niedriges Cap kann zu extrem hohen Preisen und wirtschaftlichen Belastungen führen. Der jährliche Reduktionspfad des

Caps ist ebenfalls entscheidend, um langfristige Planungssicherheit zu gewährleisten und die Ambition des Systems zu signalisieren (Kim, 2021).

Die **Allokation von Emissionsrechten** ist ein weiteres kritisches Designelement im Emissionshandel. Zertifikate können versteigert oder kostenlos zugeteilt werden (Weiqi et al., 2018). Die Versteigerung wird aus Effizienzgründen und zur Generierung von Einnahmen bevorzugt, da sie Wettbewerbsverzerrungen minimiert und das “Verursacherprinzip” stärkt (Garcia-Torea et al., 2021). Kostenlose Zuteilungen, oft auf Basis historischer Emissionen (Grandfathering) oder Benchmarks, werden häufig aus Gründen der politischen Akzeptanz und zur Vermeidung von Carbon Leakage in der Einführungsphase eingesetzt (Weiqi et al., 2018)(Healy et al., 2018). Allerdings können kostenlose Zuteilungen Windfall Profits für Unternehmen generieren und die Anreizwirkung mindern (Kim, 2021).

Die **Sektoren und Gase**, die in das System einbezogen werden, definieren den Umfang der CO₂-Bepreisung. Das EU ETS konzentriert sich hauptsächlich auf Großemittenten aus den Bereichen Energie und Industrie (Egenhofer et al., 2011). Eine breitere Abdeckung von Sektoren (z.B. Verkehr, Gebäude, Landwirtschaft) und Gasen (neben CO₂ auch Methan, Lachgas) kann die Effektivität erhöhen, birgt aber auch administrative Herausforderungen (Spiegel et al., 2024).

Preiskontrollmechanismen sind wichtig, um extreme Volatilität in Emissionshandelssystemen zu managen. Dazu gehören Preisober- und -untergrenzen (Price Collars) oder Marktstabilitätsreserven (MSR), die bei Überangebot Zertifikate vom Markt nehmen oder bei Knappheit zusätzliche Zertifikate freigeben (Holt & Shobe, 2016). Solche Mechanismen tragen zur Planbarkeit bei und erhöhen die Akzeptanz bei den Marktteilnehmern (Kim, 2021).

Schließlich sind **Komplementärmaßnahmen** unerlässlich. CO₂-Preismechanismen allein können nicht alle Marktversagen adressieren oder alle Hindernisse für Dekarbonisierung überwinden (Dütschke et al., 2025). Sie müssen oft durch andere Politiken ergänzt werden, wie z.B. Investitionen in Forschung und Entwicklung, Förderprogramme für erneuerbare En-

ergien, Regulierungen zur Energieeffizienz oder Infrastrukturprojekte (Dütschke et al., 2025). Diese ergänzenden Maßnahmen können die Wirksamkeit der CO₂-Bepreisung verstärken und den Übergang zu einer kohlenstoffarmen Wirtschaft beschleunigen.

2.3.3 Die Bedeutung der CO₂-Bepreisung für die Dekarbonisierung

Die CO₂-Bepreisung spielt eine entscheidende Rolle im globalen Bestreben zur Dekarbonisierung der Wirtschaft und zur Erreichung der Pariser Klimaziele. Ihre Bedeutung ergibt sich aus mehreren Schlüsselfunktionen:

Erstens schafft die CO₂-Bepreisung einen **ökonomischen Anreiz zur Emissionsreduktion** (Haïtes et al., 2018). Indem sie Emissionen verteuert, macht sie emissionsärmere Technologien und Verhaltensweisen wirtschaftlich attraktiver. Dies motiviert Unternehmen, in Energieeffizienz, erneuerbare Energien und Prozessoptimierungen zu investieren, um Kosten zu senken (Kim, 2021). Für Konsumenten führen höhere Preise für emissionsintensive Produkte und Dienstleistungen zu einer Verlagerung hin zu nachhaltigeren Alternativen.

Zweitens fördert die CO₂-Bepreisung **technologische Innovationen** (Anser et al., 2020). Ein stabiler und ausreichend hoher CO₂-Preis signalisiert den Forschern und Entwicklern, dass es einen Markt für kohlenstoffarme Lösungen gibt. Dies stimuliert Investitionen in Forschung und Entwicklung neuer Technologien, wie z.B. Carbon Capture and Storage (CCS) (Setyawati & Wibawa, 2024), Wasserstoffproduktion oder fortschrittliche Batterietechnologien (Anser et al., 2020). Das Innovationspotenzial ist entscheidend, um langfristig die Kosten der Dekarbonisierung zu senken und neue Wirtschaftszweige zu schaffen (Chen et al., 2025).

Drittens generiert die CO₂-Bepreisung **Einnahmen**, die für den Klimaschutz verwendet werden können (Ohlendorf et al., 2020). Insbesondere bei Kohlenstoffsteuern oder der Versteigerung von Zertifikaten entstehen beträchtliche Staatseinnahmen. Diese können reinvestiert werden, um den Übergang zu einer grünen Wirtschaft zu unterstützen, z.B.

durch Subventionen für erneuerbare Energien, Investitionen in öffentliche Verkehrsmittel, Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel oder die Unterstützung von Haushalten, die besonders von den Preissteigerungen betroffen sind (Ohlendorf et al., 2020).

Viertens trägt die CO₂-Bepreisung zur **Kosteneffizienz der Klimapolitik** bei (Gronwald & Ketterer, 2009). Indem sie den Markt die effizientesten Reduktionsmöglichkeiten identifizieren lässt, minimiert sie die Gesamtkosten der Emissionsminderung für die Gesellschaft. Dies ist ein entscheidender Vorteil gegenüber reinen Regulierungen, die oft nicht die kostengünstigsten Lösungen fördern (Gronwald & Ketterer, 2009).

Fünftens sendet die CO₂-Bepreisung ein **klares und konsistentes Preissignal** an alle Wirtschaftsbereiche (Timilsina, 2018). Dieses Signal integriert Klimaaspekte in alle Investitions- und Konsumententscheidungen und hilft, die Wirtschaft langfristig auf einen kohlenstoffarmen Pfad auszurichten. Es schafft Planbarkeit und reduziert die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen (He & Peng, 2024).

Zusammenfassend ist die CO₂-Bepreisung ein multifunktionales Instrument, das durch Anreize, Innovationen und Einnahmen einen wesentlichen Beitrag zur Dekarbonisierung leisten kann. Sie ist ein zentraler Baustein einer umfassenden Klimastrategie und wird zunehmend als unverzichtbar für das Erreichen ambitionierter Klimaziele auf globaler Ebene angesehen (Digitemie & Ekemezie, 2024).

2.4 Empirische Studien zur Wirksamkeit von CO₂-Preismechanismen

Die theoretischen Vorteile der CO₂-Bepreisung sind weithin anerkannt, doch die tatsächliche Wirksamkeit in der Praxis ist Gegenstand zahlreicher empirischer Studien. Diese Untersuchungen bewerten, inwieweit CO₂-Preismechanismen tatsächlich zu Emissionsreduktionen führen, welche Auswirkungen sie auf die Wirtschaft haben und ob sie Innovationen fördern. Die Ergebnisse sind vielfältig und hängen stark von der spezifischen Ausgestaltung des jeweiligen Instruments und dem nationalen Kontext ab.

2.4.1 Reduktion von Treibhausgasemissionen

Eine der primären Zielsetzungen von CO₂-Preismechanismen ist die Reduktion von Treibhausgasemissionen. Empirische Evidenz aus verschiedenen Regionen und Sektoren deutet darauf hin, dass sowohl Kohlenstoffsteuern als auch Emissionshandelssysteme, wenn sie ausreichend ambitioniert sind, zu messbaren Emissionsminderungen beitragen können (Haïtes et al., 2018)(Döbbeling-Hildebrandt et al., 2024)(Isah et al., 2023).

Studien zu Kohlenstoffsteuern zeigen oft eine positive Korrelation zwischen der Höhe des Steuersatzes und der Reduktion der Emissionen. Haïtes, Duan et al. (2018) fassen die Erfahrungen mit Kohlenstoffsteuern in verschiedenen Ländern zusammen und stellen fest, dass diese in vielen Fällen zu signifikanten Emissionsreduktionen geführt haben, insbesondere wenn die Steuersätze substantiell waren (Haïtes et al., 2018). Ein prominentes Beispiel ist Schweden, das 1991 eine Kohlenstoffsteuer einführte und seitdem eine deutliche Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Emissionen erreicht hat (Haïtes et al., 2018). Dänemark wird ebenfalls als Beispiel für effektive Klimaschutzpolitik durch CO₂-Bepreisung genannt (Batini et al., 2020). Eine Meta-Analyse von ex-post-Evaluationen von CO₂-Bepreisungsmaßnahmen durch Döbbeling-Hildebrandt, Miersch et al. (2024) bestätigt, dass diese Instrumente im Allgemeinen zu Emissionsreduktionen führen, wobei die Höhe der Reduktion von der Politikgestaltung und dem Kontext abhängt (Döbbeling-Hildebrandt et al., 2024).

Auch für Emissionshandelssysteme gibt es Belege für ihre Wirksamkeit. Das EU ETS, obwohl in seinen frühen Phasen mit Problemen behaftet, wird in späteren Phasen als wirksames Instrument zur Emissionsreduktion angesehen (Klimko & Hasprová, 2025)(Kim, 2021). Klimko und Hasprová (2025) untersuchen den Einfluss des EU ETS auf die Treibhausgasemissionen in der EU und finden signifikante Reduktionen, insbesondere in den Sektoren, die vom System erfasst werden (Klimko & Hasprová, 2025). Eine frühere Analyse von Clò (2011) deutete jedoch darauf hin, dass die Wirksamkeit in den ersten Phasen begrenzt war, was auf die Überallokation von Zertifikaten zurückzuführen war (Clò, 2011). Die Reformen in Phase 3 und 4, insbesondere die Einführung der Marktstabilitätsreserve und die Anhebung

des Reduktionsfaktors, haben jedoch zu einer Stärkung des Preissignals und damit zu einer effektiveren Emissionsminderung geführt (Kim, 2021). Studien aus China zeigen ebenfalls, dass Pilotprogramme für den Emissionshandel zu einer Verbesserung der Luftqualität und einer Steigerung der grünen Innovationen führen können (Chen et al., 2025). Isah, Raheem et al. (2023) untersuchen den Emissionsreduktionseffekt der CO₂-Bepreisung und bestätigen dessen positiven Einfluss auf die Verringerung von Emissionen (Isah et al., 2023).

Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass die Wirksamkeit nicht universell ist. Niedrige oder volatile CO₂-Preise, wie sie in den frühen Phasen des EU ETS beobachtet wurden, können die Anreizwirkung erheblich schwächen (Clò, 2011). Zudem können politische Unsicherheiten die Preisschwankungen auf Kohlenstoffmärkten verstärken und somit die Effektivität beeinträchtigen (Chen et al., 2025). Die Komplexität der Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Politikinstrumenten und wirtschaftlichen Entwicklungen macht eine kausale Zuschreibung der Emissionsreduktionen allein auf die CO₂-Bepreisung oft schwierig, doch die überwiegende Mehrheit der Forschung bestätigt ihren Beitrag zur Dekarbonisierung.

2.4.2 Auswirkungen auf Wirtschaft und Wettbewerbsfähigkeit

Die Einführung von CO₂-Preismechanismen wirft oft Bedenken hinsichtlich ihrer potenziellen negativen Auswirkungen auf die Wirtschaft, insbesondere auf die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen und das Wirtschaftswachstum auf. Empirische Studien haben diese Effekte untersucht und zeigen ein differenziertes Bild.

Ein zentrales Thema ist das **Carbon Leakage**, also die Verlagerung von Emissionen und Produktion in Länder mit weniger strengen Klimaschutzauflagen (Healy et al., 2018). Healy, Schumacher et al. (2018) analysieren Carbon Leakage unter Phase III des EU ETS und finden, dass es in einigen energieintensiven Sektoren ein Risiko für Carbon Leakage gibt, die empirischen Belege für großflächige Verlagerungen jedoch begrenzt sind (Healy et al., 2018). Maßnahmen wie die kostenlose Zuteilung von Zertifikaten für Sektoren mit hohem Carbon Leakage-Risiko oder die geplante Einführung des Carbon Border Adjustment Mechanism

(CBAM) sollen diesem Risiko entgegenwirken (Lysunets, 2023)(Yang et al., 2024). Yang, Wu et al. (2024) untersuchen die Auswirkungen des CBAM auf den Handel und stellen fest, dass er das Potenzial hat, Carbon Leakage zu reduzieren und faire Wettbewerbsbedingungen zu schaffen, aber auch neue Herausforderungen für den internationalen Handel mit sich bringt (Yang et al., 2024).

Hinsichtlich der **makroökonomischen Leistung** zeigen Studien, dass die Einführung von CO₂-Preisen nicht unbedingt zu einem Rückgang des Bruttoinlandsprodukts (BIP) oder der Beschäftigung führen muss. Olasehinde-Williams (2024) untersucht den Zusammenhang zwischen CO₂-Bepreisung und gesamtwirtschaftlicher Leistung und stellt fest, dass die Auswirkungen stark von der Reinvestition der Einnahmen und der Flexibilität der Wirtschaft abhängen (Olasehinde-Williams, 2024). Wenn die Einnahmen aus der CO₂-Bepreisung zur Senkung anderer Steuern oder zur Förderung von Investitionen in grüne Technologien verwendet werden, können die negativen Effekte abgemildert oder sogar in positive Wachstumsimpulse umgewandelt werden (Ohlendorf et al., 2020). Eine Meta-Analyse von Ohlendorf, Jakob et al. (2020) zu Verteilungswirkungen der CO₂-Bepreisung zeigt, dass die Belastung für Haushalte mit niedrigem Einkommen oft höher ist, aber durch Kompensationsmaßnahmen ausgeglichen werden kann (Ohlendorf et al., 2020). Dies unterstreicht die Bedeutung eines “Recycling” der Einnahmen, um soziale Ungleichheiten zu vermeiden und die politische Akzeptanz zu erhöhen (Ohlendorf et al., 2020).

Die **Wettbewerbsfähigkeit einzelner Unternehmen** kann in der Tat beeinträchtigt werden, insbesondere für energieintensive Industrien, die internationalem Wettbewerb ausgesetzt sind. Dies ist der Grund, warum viele Emissionshandelssysteme Mechanismen zur Unterstützung dieser Sektoren vorsehen (Healy et al., 2018). Langfristig können CO₂-Preise jedoch auch die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen steigern, indem sie Anreize für Effizienzsteigerungen und die Entwicklung innovativer, kohlenstoffarmer Produkte und Prozesse schaffen. Unternehmen, die frühzeitig in Dekarbonisierung investieren, könnten einen Wettbewerbsvorteil auf zukünftigen Märkten erlangen (Anser et al., 2020).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die wirtschaftlichen Auswirkungen der CO₂-Bepreisung komplex sind und von der spezifischen Gestaltung, dem politischen Kontext und den begleitenden Maßnahmen abhängen. Während Risiken wie Carbon Leakage und Belastungen für bestimmte Sektoren existieren, können diese durch intelligente Politikgestaltung, wie den CBAM oder das Einnahmen-Recycling, gemindert werden. Eine gut konzipierte CO₂-Bepreisung muss nicht zwingend zu negativen makroökonomischen Effekten führen, sondern kann im Gegenteil langfristig zu einer resilienteren und innovativeren Wirtschaft beitragen (Olasehinde-Williams, 2024).

2.4.3 Innovation und technologischer Wandel

Ein wesentlicher indirekter Effekt der CO₂-Bepreisung, der für die langfristige Dekarbonisierung von entscheidender Bedeutung ist, ist die Förderung von Innovationen und technologischem Wandel (Anser et al., 2020). Indem ein Preis auf Emissionen gelegt wird, erhalten Unternehmen einen starken Anreiz, in Forschung und Entwicklung (F&E) zu investieren, um emissionsarme oder emissionsfreie Technologien zu entwickeln und zu implementieren.

Empirische Studien bestätigen, dass CO₂-Preismechanismen einen positiven Einfluss auf die grüne Innovation haben können (Anser et al., 2020). Anser, Khan et al. (2020) untersuchen den Zusammenhang zwischen Umwelt, technologischer Innovation und Kohlenstoffemissionen und finden, dass Umweltpolitiken, einschließlich der CO₂-Bepreisung, die technologische Innovation anregen können, die wiederum zu Emissionsreduktionen führt (Anser et al., 2020). Dies geschieht durch zwei Hauptmechanismen:

1. **Anreiz zur Kostensenkung:** Mit einem CO₂-Preis werden Emissionen zu einem Kostenfaktor. Unternehmen sind motiviert, Prozesse zu optimieren und Technologien zu implementieren, die ihre Emissionen reduzieren, um die Kosten für Emissionszertifikate oder CO₂-Steuern zu minimieren (Kim, 2021). Dies kann die Einführung bestehender energieeffizienter Technologien beschleunigen oder zur Entwicklung völlig neuer, bahnbrechender Lösungen anregen.

2. Schaffung neuer Märkte: Ein stabiler und ausreichend hoher CO₂-Preis signalisiert den F&E-Abteilungen und Start-ups, dass es einen wachsenden Markt für kohlenstoffarme Produkte und Dienstleistungen gibt. Dies zieht Investitionen an und fördert die Entwicklung von Innovationen in Bereichen wie erneuerbare Energien, Energiespeicherung, Carbon Capture and Storage (CCS) (Setyawati & Wibawa, 2024) und nachhaltige Materialwissenschaften.

Beispielsweise haben Studien zum EU ETS gezeigt, dass das System Unternehmen dazu angeregt hat, in Energieeffizienzmaßnahmen und die Umstellung auf emissionsärmere Brennstoffe zu investieren (Kim, 2021). Darüber hinaus gibt es Hinweise darauf, dass der CO₂-Preis die Patentanmeldungen im Bereich grüner Technologien positiv beeinflusst hat (Anser et al., 2020). Im chinesischen Kontext deuten Chen, Xu et al. (2025) darauf hin, dass Pilotpolitiken für den Emissionshandel die Qualität neuer Patente erhöhen können, was auf eine Steigerung der grünen Innovation hinweist (Chen et al., 2025).

Allerdings ist der Zusammenhang zwischen CO₂-Bepreisung und Innovation nicht immer linear. Die Wirksamkeit hängt von der Höhe und Stabilität des CO₂-Preises ab. Ein zu niedriger oder zu volatiler Preis sendet möglicherweise kein ausreichend starkes Signal, um signifikante F&E-Investitionen auszulösen (Chen et al., 2025). Zudem können Komplementärmaßnahmen, wie F&E-Subventionen oder Technologiestandards, die Innovationswirkung der CO₂-Bepreisung verstärken, indem sie Markteintrittsbarrieren senken und Risiken für innovative Unternehmen reduzieren (Dütschke et al., 2025). Die synergetische Wirkung von CO₂-Bepreisung mit anderen innovationsfördernden Politiken ist oft größer als die Summe der einzelnen Instrumente (Dütschke et al., 2025). Letztendlich ist die Förderung von Innovationen durch CO₂-Preismechanismen ein entscheidender Faktor, um die langfristigen Dekarbonisierungsziele zu erreichen und die Kosten des Übergangs zu einer kohlenstoffneutralen Wirtschaft zu senken.

2.5 Kritische Perspektiven und Herausforderungen der CO₂-Bepreisung

Trotz der weithin anerkannten Vorteile und der empirischen Belege für die Wirksamkeit von CO₂-Preismechanismen sind diese Instrumente nicht ohne Herausforderungen und unterliegen kritischen Perspektiven. Diese Kritikpunkte sind entscheidend für die Gestaltung robuster und sozial gerechter Klimapolitiken.

2.5.1 Carbon Leakage und Wettbewerbsnachteile

Eine der am häufigsten genannten Herausforderungen von CO₂-Preismechanismen ist das sogenannte **Carbon Leakage** (Healy et al., 2018). Dieses Phänomen tritt auf, wenn Unternehmen ihre Produktion oder Investitionen von Regionen mit strengen CO₂-Preisen in Regionen mit weniger strengen oder gar keinen Klimaschutzauflagen verlagern. Die Folge wäre, dass die Emissionen nicht global reduziert, sondern lediglich geografisch verschoben würden, was die Wirksamkeit der Klimapolitik untergraben und zu Wettbewerbsnachteilen für die betroffenen Industrien führen könnte (Healy et al., 2018).

Empirische Studien zum Carbon Leakage, insbesondere im Kontext des EU ETS, haben gemischte Ergebnisse geliefert. Während einige Studien ein erhöhtes Risiko für bestimmte energieintensive Sektoren identifizieren, sind die Beweise für massive Verlagerungen bisher begrenzt (Healy et al., 2018). Dies liegt oft daran, dass die Kosten der Verlagerung (z.B. neue Infrastruktur, Lieferkettenunterbrechungen, Qualifikationsverluste) die potenziellen Einsparungen durch niedrigere CO₂-Kosten überwiegen. Dennoch bleibt das Risiko bestehen und ist ein zentrales Anliegen der Politik.

Um Carbon Leakage entgegenzuwirken, wurden verschiedene Maßnahmen ergriffen und vorgeschlagen: * **Kostenlose Zuteilung von Zertifikaten:** In Emissionshandelssystemen erhalten Sektoren, die als besonders anfällig für Carbon Leakage gelten, oft einen größeren Anteil an kostenlosen Emissionszertifikaten (Healy et al., 2018). Dies mindert ihre

direkten CO₂-Kosten und soll ihre Wettbewerbsfähigkeit schützen. Allerdings kann dies zu “Windfall Profits” führen und die Anreizwirkung zur Emissionsreduktion verringern (Kim, 2021). * **Benchmarks:** Die kostenlose Zuteilung kann an Benchmarks gebunden werden, die die Zuteilung an die Effizienz der Produktion koppeln, um Anreize zur Effizienzsteigerung zu erhalten. * **CO₂-Grenzausgleichsmechanismus (CBAM):** Der CBAM ist ein innovativer Ansatz, der darauf abzielt, den Preis für CO₂-Emissionen, der auf bestimmte Produkte in der EU gezahlt wurde, auch auf Importe dieser Produkte aus Drittländern anzuwenden (Lysunets, 2023). Dies soll gleiche Wettbewerbsbedingungen schaffen und verhindern, dass Unternehmen ihre Produktion außerhalb der EU verlagern, um CO₂-Kosten zu umgehen (Yang et al., 2024). Yang, Wu et al. (2024) analysieren die Auswirkungen des CBAM auf den Handel und betonen sein Potenzial, Carbon Leakage entgegenzuwirken, weisen aber auch auf die Komplexität der Implementierung und die potenziellen Auswirkungen auf Handelspartner hin (Yang et al., 2024).

Die Herausforderung besteht darin, ein Gleichgewicht zwischen effektivem Klimaschutz und der Wahrung der Wettbewerbsfähigkeit der heimischen Industrie zu finden. Ein zu aggressiver Ansatz könnte zu unerwünschten wirtschaftlichen Folgen führen, während ein zu zögerlicher Ansatz die Klimaziele gefährden könnte. Die Lösung erfordert internationale Koordination und innovative politische Instrumente wie den CBAM, die die externen Kosten der Emissionen global internalisieren.

2.5.2 Verteilungswirkungen und soziale Akzeptanz

Die Einführung von CO₂-Preisen kann erhebliche **Verteilungswirkungen** haben, die die soziale Akzeptanz dieser Politik maßgeblich beeinflussen (Ohlendorf et al., 2020). Da CO₂-Preise die Kosten für Energie und emissionsintensive Produkte erhöhen, können sie Haushalte mit niedrigem Einkommen überproportional belasten, da diese oft einen größeren Anteil ihres Einkommens für solche Güter ausgeben. Dies wird als “regressiver Effekt” der CO₂-Bepreisung bezeichnet (Ohlendorf et al., 2020).

Ohlendorf, Jakob et al. (2020) führen eine Meta-Analyse zu den Verteilungswirkungen der CO₂-Bepreisung durch und bestätigen, dass diese oft regressiv sind, aber durch geeignete Maßnahmen abgemildert oder sogar progressiv gestaltet werden können (Ohlendorf et al., 2020). Beispiele für solche Ausgleichsmaßnahmen sind:

- * **Pro-Kopf-Ausschüttungen (Carbon Dividends):** Die Einnahmen aus der CO₂-Bepreisung werden gleichmäßig an alle Bürger zurückverteilt. Dies kann Haushalte mit niedrigem Einkommen entlasten und die soziale Akzeptanz erhöhen, da sie möglicherweise mehr zurückerhalten, als sie durch die CO₂-Preise zusätzlich bezahlen (Ohlendorf et al., 2020).
- * **Gezielte Unterstützung:** Direkte Transfers oder Subventionen für einkommensschwache Haushalte, um ihnen bei der Bewältigung höherer Energiekosten zu helfen oder Investitionen in Energieeffizienz zu ermöglichen.
- * **Steuerentlastungen:** Die Einnahmen können zur Senkung anderer Steuern (z.B. Einkommensteuer oder Mehrwertsteuer) verwendet werden, was breite Entlastung schafft, aber möglicherweise nicht so gezielt auf vulnerable Gruppen wirkt.
- * **Investitionen in öffentliche Güter:** Einnahmen können in den Ausbau des öffentlichen Nahverkehrs, erneuerbare Energien oder soziale Infrastruktur investiert werden, wovon die gesamte Gesellschaft profitiert, insbesondere aber auch einkommensschwächere Schichten.

Die **soziale Akzeptanz** ist ein kritischer Faktor für die langfristige Stabilität und Wirksamkeit von CO₂-Preismechanismen. Widerstand in der Bevölkerung, wie er beispielsweise bei der “Gelbwesten”-Bewegung in Frankreich aufgrund von Kraftstoffpreiserhöhungen sichtbar wurde, kann die Implementierung oder Aufrechterhaltung solcher Politiken erheblich erschweren (Dütschke et al., 2025). Daher ist eine transparente Kommunikation über die Notwendigkeit der CO₂-Bepreisung, ihre Vorteile und die geplanten Ausgleichsmaßnahmen von entscheidender Bedeutung (Dütschke et al., 2025). Die Bürger müssen verstehen, dass die Kosten des Klimawandels ohne Maßnahmen wesentlich höher sein werden und dass die CO₂-Bepreisung ein effizienter Weg ist, diese Kosten zu internalisieren und den Übergang zu einer nachhaltigeren Wirtschaft zu finanzieren. Die Einbeziehung der Öffentlichkeit

und eine gerechte Lastenverteilung sind somit nicht nur ethische, sondern auch pragmatische Imperative für eine erfolgreiche Klimapolitik (Ohlendorf et al., 2020).

2.5.3 Politische Umsetzbarkeit und Governance-Fragen

Die politische Umsetzbarkeit von CO₂-Preismechanismen ist eine weitere große Herausforderung. Die Einführung eines Preises für CO₂-Emissionen ist oft politisch umstritten, da sie direkt die Kosten für Unternehmen und Haushalte beeinflusst und somit starke Lobbyinteressen und öffentlichen Widerstand hervorrufen kann (Dütschke et al., 2025).

Governance-Fragen umfassen die institutionelle Gestaltung, die Regulierung und die Überwachung der CO₂-Märkte. Ein gut funktionierendes Emissionshandelssystem erfordert eine robuste Governance-Struktur, die Transparenz, Integrität und Fairness gewährleistet (Kim, 2021). Dies beinhaltet die Festlegung klarer Regeln für die Allokation von Zertifikaten, die Überwachung von Emissionen, die Durchsetzung von Compliance und die Handhabung von Marktmanipulationen (Herman, 2024). Die Erfahrungen des EU ETS in seinen frühen Phasen haben gezeigt, dass eine Überallokation von Zertifikaten und unzureichende Preiskontrollmechanismen die Wirksamkeit eines Systems erheblich untergraben können (Clò, 2011). Die Implementierung der Marktstabilitätsreserve (MSR) im EU ETS war eine Reaktion auf diese Governance-Herausforderungen und hat dazu beigetragen, die Preisstabilität und somit die Wirksamkeit des Systems zu verbessern (Holt & Shobe, 2016).

Politische Kontinuität und Langfristigkeit sind ebenfalls entscheidend. Unternehmen benötigen langfristige Planungssicherheit, um in kohlenstoffarme Technologien zu investieren (Chen et al., 2025). Häufige Änderungen der Regeln, Unsicherheiten über zukünftige CO₂-Preise oder die Gefahr einer politischen Rücknahme der Maßnahmen können Investitionen abschrecken und den Übergang verlangsamen (Chen et al., 2025). Gronwald, Ketterer (2009) diskutieren die Bewertung von Emissionshandel als Politikinstrument und

betonen die Bedeutung von Glaubwürdigkeit und Konsistenz der politischen Rahmenbedingungen (Gronwald & Ketterer, 2009).

Internationale Koordination ist ebenfalls eine wichtige Governance-Frage. Um das Problem des Carbon Leakage effektiv zu adressieren und eine globale Klimapolitik zu fördern, ist eine engere Abstimmung und möglicherweise eine Harmonisierung von CO₂-Preisen oder -Mechanismen zwischen Ländern wünschenswert (Lysunets, 2023). Der Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) der EU ist ein Versuch, diese Herausforderung auf unilateraler Ebene anzugehen, könnte aber auch zu Handelskonflikten führen, wenn er nicht sorgfältig implementiert wird und internationale Partner nicht ausreichend eingebunden werden (Yang et al., 2024).

Zusammenfassend erfordert die erfolgreiche Implementierung und Aufrechterhaltung von CO₂-Preismechanismen nicht nur ein fundiertes ökonomisches Design, sondern auch eine kluge politische Strategie, die soziale Gerechtigkeit, Wettbewerbsfähigkeit und internationale Zusammenarbeit berücksichtigt. Ohne eine starke Governance und politische Unterstützung kann selbst das am besten konzipierte Instrument seine Wirkung verfehlen (Dütschke et al., 2025).

2.5.4 Die Rolle von Komplementärmaßnahmen

Eine häufige kritische Perspektive auf die CO₂-Bepreisung ist die Erkenntnis, dass sie zwar ein potentes, aber kein alleiniges Allheilmittel für den Klimawandel ist. Die **Rolle von Komplementärmaßnahmen** wird zunehmend als entscheidend für die Maximierung der Wirksamkeit von CO₂-Preismechanismen und die Beschleunigung der Dekarbonisierung anerkannt (Dütschke et al., 2025). Marktversagen, die über die bloße Externalität der Emissionen hinausgehen, wie Informationsasymmetrien, Kapitalmarktunvollkommenheiten oder die Notwendigkeit von Infrastrukturinvestitionen, können durch einen reinen CO₂-Preis nicht vollständig behoben werden.

Beispiele für notwendige Komplementärmaßnahmen sind:

- * **Forschung und Entwicklung (F&E)-Förderung:** Obwohl CO₂-Preise Innovationen anregen, sind die Vorlaufkosten und Risiken für die Entwicklung bahnbrechender kohlenstoffarmer Technologien oft sehr hoch. Staatliche F&E-Förderung kann dazu beitragen, diese Risiken zu mindern und die Entwicklung kritischer Technologien zu beschleunigen (Anser et al., 2020).
- * **Regulierungen und Standards:** Energieeffizienzstandards für Gebäude, Geräte oder Fahrzeuge können Marktbarrieren überwinden, die verhindern, dass der CO₂-Preis seine volle Wirkung entfaltet (z.B. Mieter-Vermieter-Dilemma). Auch die Regulierung von Industrieemissionen, die schwer zu bepreisen sind, kann notwendig sein (Spiegel et al., 2024).
- * **Infrastrukturinvestitionen:** Der Übergang zu einer kohlenstoffarmen Wirtschaft erfordert massive Investitionen in neue Infrastrukturen, wie Stromnetze für erneuerbare Energien, Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge oder Wasserstoffpipelines (Falanga et al., 2025). Diese Investitionen sind oft mit hohen Fixkosten und langen Amortisationszeiten verbunden, die staatliche Unterstützung erfordern können.
- * **Subventionen und Förderprogramme:** Gezielte Subventionen für den Ausbau erneuerbarer Energien, Wärmepumpen oder energieeffiziente Sanierungen können den Wandel beschleunigen, insbesondere in Sektoren, in denen der CO₂-Preis allein möglicherweise nicht ausreicht oder wo es um die Überwindung von Skalierungseffekten geht (Dütschke et al., 2025).
- * **Informationskampagnen und Bildungsangebote:** Um Verhaltensänderungen bei Konsumenten und Unternehmen zu fördern, sind Informationskampagnen über die Vorteile von Klimaschutzmaßnahmen und die Möglichkeiten zur Emissionsreduktion unerlässlich.

Dütschke, Kantel et al. (2025) argumentieren, dass eine effektive Klimapolitik einen Mix aus harten (wie CO₂-Preismechanismen) und weichen politischen Instrumenten erfordert (Dütschke et al., 2025). Die Kombination von CO₂-Bepreisung mit gezielten Regulierungen, Subventionen und Infrastrukturinvestitionen kann Synergien schaffen, die die Wirksamkeit der einzelnen Instrumente übertreffen. Ohne solche Komplementärmaßnahmen besteht die Gefahr, dass der CO₂-Preis allein nicht ausreicht, um die notwendige Geschwindigkeit und

Tiefe der Transformation zu erreichen, insbesondere in Sektoren mit hohen Reduktionskosten oder komplexen Marktstrukturen. Die Integration von CO₂-Preisen in einen breiteren Politikmix ist somit entscheidend für eine umfassende und erfolgreiche Klimaschutzstrategie.

Die vorliegende Literaturübersicht hat die vielschichtigen Aspekte der CO₂-Bepreisung beleuchtet, von ihrer historischen Entwicklung und den umweltökonomischen Grundlagen bis hin zu ihrer empirischen Wirksamkeit und den damit verbundenen Herausforderungen. Es wurde deutlich, dass CO₂-Preismechanismen, insbesondere Emissionshandelssysteme wie das EU ETS und Kohlenstoffsteuern, ein mächtiges Instrument zur Internalisierung externer Kosten und zur Förderung von Emissionsreduktionen und Innovationen darstellen. Gleichzeitig zeigen die kritischen Perspektiven auf Carbon Leakage, Verteilungswirkungen und Governance-Fragen, dass eine erfolgreiche Implementierung eine sorgfältige Gestaltung, politische Akzeptanz und die Ergänzung durch Komplementärmaßnahmen erfordert. Die Forschung unterstreicht die Notwendigkeit eines ganzheitlichen Ansatzes, der ökonomische Effizienz mit sozialer Gerechtigkeit und technologischer Transformation verbindet, um die ambitionierten Klimaziele effektiv zu erreichen.

Methodik

Die vorliegende Masterarbeit verfolgt das Ziel, die Wirksamkeit von CO₂-Preissystemen als Instrument zur Minderung von Treibhausgasemissionen zu analysieren. Um dieses Ziel zu erreichen, wird ein robuster und systematischer Methodikansatz gewählt, der eine Kombination aus qualitativer Kontextanalyse und quantitativer Wirkungsanalyse umfasst. Dieser Abschnitt beschreibt detailliert den Analyserahmen, die Auswahlkriterien für die Fallstudien, die verwendeten Datenquellen und Messverfahren sowie die statistischen Methoden zur Wirksamkeitsanalyse. Der Fokus liegt darauf, die Transparenz und Reproduzierbarkeit der Forschung zu gewährleisten und eine fundierte Grundlage für die Bewertung der Klimaschutzwirkung von CO₂-Preissystemen zu schaffen.

2.1 Analyserahmen für die Klimaschutzwirkung

Der Analyserahmen dieser Arbeit ist darauf ausgelegt, die vielschichtige Wirkung von CO₂-Preissystemen auf die Treibhausgasemissionen systematisch zu erfassen und zu bewerten. CO₂-Preissysteme, wie der Emissionshandel oder CO₂-Steuern, setzen einen Preis auf Kohlenstoffemissionen, um externe Kosten zu internalisieren und Anreize für emissionsreduzierende Verhaltensweisen zu schaffen (Timilsina, 2018). Die erwartete Klimaschutzwirkung manifestiert sich primär durch einen Preissignalmechanismus, der Unternehmen und Haushalte dazu motiviert, in kohlenstoffarme Technologien und Prozesse zu investieren, Energieeffizienz zu steigern und emissionsintensive Aktivitäten zu reduzieren (Haites et al., 2018)(Digitomie & Ekemezie, 2024). Dieser Mechanismus ist jedoch komplex und wird von einer Vielzahl endogener und exogener Faktoren beeinflusst, darunter makroökonomische Bedingungen, technologische Entwicklungen, regulatorische Rahmenbedingungen und die öffentliche Akzeptanz.

Ein zentraler Bestandteil des Analyserahmens ist die Unterscheidung zwischen direkten und indirekten Effekten. Direkte Effekte beziehen sich auf die unmittelbar messbaren Emissionsreduktionen innerhalb der vom CO₂-Preissystem erfassten Sektoren und geografischen Gebiete. Dies umfasst beispielsweise die Reduktion von CO₂-Emissionen aus der Energieerzeugung durch den Umstieg auf erneuerbare Energien oder die Verbesserung der Effizienz in Industrieprozessen (He & Peng, 2024). Indirekte Effekte hingegen umfassen breitere Auswirkungen, die über die direkt regulierten Sektoren hinausgehen, wie z.B. Spillover-Effekte auf nicht regulierte Sektoren, technologische Innovationen, die durch das Preissignal angeregt werden (Anser et al., 2020), oder auch sogenannte “Carbon Leakage”-Effekte, bei denen emissionsintensive Industrien in Länder ohne oder mit geringeren CO₂-Preisen abwandern (Healy et al., 2018). Die Berücksichtigung dieser komplexen Wechselwirkungen ist entscheidend, um eine ganzheitliche Bewertung der Klimaschutzwirkung vorzunehmen.

Zur Operationalisierung der Klimaschutzwirkung werden spezifische Indikatoren herangezogen. Der primäre Indikator ist die absolute Reduktion der Treibhausgasemis-

sionen, gemessen in Tonnen CO₂-Äquivalenten (tCO₂e), innerhalb der Systemgrenzen der betrachteten CO₂-Preissysteme. Ergänzend dazu werden Indikatoren wie die Emissionssintensität (Emissionen pro Einheit Wirtschaftsleistung) und die Zusammensetzung des Energiemixes (Anteil erneuerbarer Energien) analysiert, um strukturelle Veränderungen in der Wirtschaft zu erfassen. Die Herausforderung besteht darin, die beobachteten Emissionsreduktionen kausal den CO₂-Preissystemen zuzuordnen und von anderen Einflussfaktoren wie Wirtschaftswachstum, technischem Fortschritt oder anderen Klimaschutzmaßnahmen abzugrenzen (Döbbeling-Hildebrandt et al., 2024)(Isah et al., 2023). Hierfür wird ein Counterfactual-Ansatz verfolgt, der versucht, ein Szenario ohne das CO₂-Preissystem zu rekonstruieren und die tatsächliche Entwicklung damit zu vergleichen.

Der Analyserahmen berücksichtigt zudem die Designelemente der CO₂-Preissysteme selbst, da diese einen erheblichen Einfluss auf deren Wirksamkeit haben. Dazu gehören die Höhe des CO₂-Preises, die Ausgestaltung des Cap-and-Trade-Systems (z.B. Auktionsmechanismen, freie Zuteilung, Mengenobergrenzen), die Abdeckung der Sektoren und Gase, die Regeln für Offsets und die Verwendung der Einnahmen (Kim, 2021)(Weiqi et al., 2018). Variationen in diesen Designelementen zwischen verschiedenen Systemen bieten eine wertvolle Grundlage für vergleichende Analysen und die Identifizierung von Best Practices. Die Arbeit wird die Hypothese untersuchen, dass ein höheres und stabileres Preissignal sowie eine breitere sektorale Abdeckung zu einer effektiveren Emissionsreduktion führen (Holt & Shobe, 2016).

Ein weiterer Aspekt des Analyserahmens ist die Betrachtung der Dynamik der Wirkungsentfaltung. Klimaschutzmaßnahmen entfalten ihre volle Wirkung oft erst über längere Zeiträume, da Investitionen in neue Technologien und Infrastrukturen Zeit benötigen. Daher wird die Analyse sowohl kurz- als auch mittelfristige Auswirkungen berücksichtigen und die Entwicklung der Emissionen vor und nach der Einführung der CO₂-Preissysteme sowie über verschiedene Phasen hinweg untersuchen. Der Analyserahmen ist somit darauf ausgelegt, eine umfassende, evidenzbasierte und nuancierte Bewertung

der Klimaschutzwirkung von CO₂-Preissystemen zu ermöglichen, indem er sowohl die quantitativen Emissionsdaten als auch die qualitativen Aspekte des Policy-Designs und des Implementierungskontextes integriert.

2.2 Auswahlkriterien für Fallstudien

Die Auswahl der Fallstudien ist entscheidend für die Aussagekraft der Analyse und die Generalisierbarkeit der Ergebnisse. Für diese Masterarbeit wurden das Europäische Emissionshandelssystem (EU ETS) und das kalifornische Cap-and-Trade-Programm (California ETS) als primäre Fallstudien ausgewählt. Diese Systeme repräsentieren zwei der größten und am längsten etablierten CO₂-Preissysteme weltweit und bieten eine reiche Datenbasis sowie vielfältige Erfahrungen in der Implementierung und Weiterentwicklung von Emissionshandelssystemen (Egenhofer et al., 2011)(Clò, 2011). Die Auswahl basiert auf mehreren spezifischen Kriterien, die darauf abzielen, eine robuste Vergleichbarkeit und eine umfassende Untersuchung der Forschungsfrage zu ermöglichen.

Ein zentrales Kriterium war die **Reife und Etablierung des Systems**. Sowohl das EU ETS als auch das California ETS sind seit über einem Jahrzehnt in Betrieb, was eine ausreichende Zeitspanne für die Beobachtung von Wirkungen und die Analyse von langfristigen Trends ermöglicht. Das EU ETS wurde 2005 eingeführt und hat seitdem mehrere Phasen durchlaufen, die wichtige Anpassungen und Reformen umfassten (Kim, 2021). Das California ETS startete 2013 und hat sich als eines der ambitioniertesten und umfassendsten regionalen Systeme in Nordamerika etabliert. Die lange Betriebszeit ermöglicht die Untersuchung von Anpassungsprozessen und die Bewertung der Wirksamkeit unter verschiedenen Marktbedingungen und regulatorischen Rahmenbedingungen.

Zweitens war die **Datenverfügbarkeit und -qualität** ein entscheidendes Auswahlkriterium. Beide Systeme zeichnen sich durch eine hohe Transparenz und Zugänglichkeit von Emissionsdaten, Allokationsdaten, Marktpreisen für Emissionszertifikate und relevanten makroökonomischen Indikatoren aus. Offizielle Berichte von

Regulierungsbehörden wie der Europäischen Umweltagentur und dem California Air Resources Board (CARB) bieten detaillierte Informationen, die für eine quantitative Analyse unerlässlich sind. Die Verfügbarkeit konsistenter Zeitreihendaten ist eine Voraussetzung für die Anwendung der geplanten statistischen Methoden.

Drittens wurde die **geografische und ökonomische Diversität** berücksichtigt. Das EU ETS deckt eine Vielzahl von Sektoren (Energieerzeugung, energieintensive Industrie, Luftfahrt) in 27 EU-Mitgliedstaaten sowie Island, Liechtenstein und Norwegen ab und repräsentiert eine große, diverse Wirtschaftsregion (Egenhofer et al., 2011). Das California ETS hingegen ist ein subnationales System, das eine führende Rolle in der US-amerikanischen Klimapolitik einnimmt und eine innovative Kombination aus Emissionshandel und anderen Klimaschutzmaßnahmen implementiert hat. Dieser Vergleich ermöglicht es, die Wirksamkeit von CO₂-Preissystemen in unterschiedlichen Governance-Strukturen und wirtschaftlichen Kontexten zu untersuchen.

Viertens wurden die **Unterschiede im Systemdesign** als wichtiges Kriterium herangezogen. Obwohl beide Systeme Cap-and-Trade-Mechanismen nutzen, gibt es signifikante Unterschiede in der Ausgestaltung, die interessante Vergleichspunkte bieten. Beispielsweise variieren die Allokationsmethoden (Auktionierung vs. freie Zuteilung), die Einbeziehung von Sektoren (z.B. Transportsektor in Kalifornien), die Verwendung von Offset-Mechanismen und die Steuerung des Preises (z.B. Preisuntergrenze in Kalifornien) (Holt & Shobe, 2016). Diese Designvariationen ermöglichen es, Hypothesen über den Einfluss spezifischer Politikinstrumente auf die Emissionsreduktion zu testen. Die Analyse dieser Unterschiede ist entscheidend, um Empfehlungen für die Gestaltung zukünftiger oder die Reform bestehender CO₂-Preissysteme abzuleiten.

Darüber hinaus wurde die **Relevanz für die Klimapolitikforschung** berücksichtigt. Beide Systeme sind Gegenstand intensiver wissenschaftlicher Debatten und Evaluierungen (Klimko & Hasprová, 2025)(Clò, 2011). Die vorliegende Arbeit kann auf einer breiten Basis bestehender Literatur aufbauen und gleichzeitig neue Erkenntnisse

durch einen vergleichenden Ansatz und spezifische Analysemethoden liefern (Döbbeling-Hildebrandt et al., 2024)(Hu et al., 2022). Die kontinuierliche Weiterentwicklung und Anpassung dieser Systeme bietet zudem die Möglichkeit, die Dynamik von Klimapolitik und deren Auswirkungen auf die Emissionsentwicklung zu untersuchen.

Potenzielle weitere Fallstudien, wie das Emissionshandelssystem in Südkorea oder die Pilotprojekte in China, wurden in der Vorstudie in Betracht gezogen. Obwohl diese Systeme ebenfalls wertvolle Einblicke bieten, wurden sie aufgrund unterschiedlicher Reifegrade, geringerer Datenverfügbarkeit über einen längeren Zeitraum oder spezifischer institutioneller Rahmenbedingungen, die die Vergleichbarkeit erschweren könnten, für diese Arbeit nicht als primäre Fallstudien ausgewählt. Die Konzentration auf EU ETS und California ETS ermöglicht eine tiefgehende Analyse mit hoher Datenqualität und Vergleichbarkeit, was für die Erzielung robuster Ergebnisse von größter Bedeutung ist.

Abbildung 1: Analyserahmen für die Klimaschutzwirkung von CO₂-Preissystemen

Anmerkung: Die Abbildung illustriert den Analyserahmen, der zur Bewertung der Klimaschutzwirkung von CO₂-Preissystemen verwendet wird. Sie zeigt die Kette von Designelementen über das Preissignal zu direkten und indirekten Effekten, die letztlich die messbare Klimaschutzwirkung beeinflussen. Kontrollvariablen wie makroökonomische Bedingungen und andere Klimapolitiken wirken auf alle Ebenen ein.

2.3 Datenquellen und Messverfahren

Die Qualität und Verfügbarkeit der Daten sind von entscheidender Bedeutung für die Validität der empirischen Analyse. Für die Untersuchung der Klimaschutzwirkung von CO₂-Preissystemen werden primär quantitative Zeitreihendaten herangezogen, die aus einer Kombination offizieller Quellen und etablierter wissenschaftlicher Datenbanken stammen. Die Datenerhebung erstreckt sich über den Zeitraum von 2000 bis zum aktuellsten verfü-

baren Jahr (i.d.R. 2022 oder 2023), um eine ausreichende Vor- und Nachbeobachtungszeit für die Einführung und Entwicklung der jeweiligen CO₂-Preissysteme zu gewährleisten.

2.3.1 Emissionsdaten Die zentralen Datenpunkte sind die Treibhausgasemissionen der vom Emissionshandel erfassten Sektoren. * **Für das EU ETS:** Die Emissionsdaten werden hauptsächlich von der Europäischen Umweltagentur (EEA) bezogen, die die jährlichen verifizierten Emissionen der Anlagen im EU ETS veröffentlicht. Diese Daten umfassen CO₂-Emissionen aus Verbrennungsprozessen in der Energiewirtschaft und energieintensiven Industrien sowie aus der Luftfahrt. Die EEA-Datenbank bietet detaillierte Informationen auf Anlagen- und Länderbasis, die eine Aggregation auf Systemebene ermöglichen (Klimko & Hasprová, 2025). * **Für das California ETS:** Emissionsdaten werden vom California Air Resources Board (CARB) bereitgestellt. CARB veröffentlicht jährliche Berichte über die Emissionen der erfassten Sektoren, einschließlich Stromerzeugung, Industrie, gewerbliche und private Gebäude sowie Transport (Marino et al., 2019). Diese Daten sind entscheidend, um die direkten Auswirkungen des kalifornischen Systems zu messen.

Zusätzlich zu den direkten Emissionen werden auch nationale Gesamtemissionen (aus allen Sektoren) von Eurostat für die EU-Länder und von der U.S. Environmental Protection Agency (EPA) für Kalifornien bzw. die USA herangezogen, um mögliche Spillover-Effekte oder Carbon Leakage auf nicht erfasste Sektoren oder Regionen zu identifizieren (Healy et al., 2018).

2.3.2 Ökonomische Daten Um die Emissionsentwicklung im Kontext der wirtschaftlichen Aktivität zu analysieren und potenzielle Störfaktoren zu kontrollieren, werden verschiedene makroökonomische Indikatoren einbezogen: * **Bruttoinlandsprodukt (BIP):** Daten zum realen BIP werden von Eurostat für die EU-Länder und vom Bureau of Economic Analysis (BEA) für Kalifornien und die USA bezogen. Das BIP dient als Maß für die Wirtschaftsleistung und ist entscheidend, um die Emissionsintensität zu berechnen und den Einfluss des Wirtschaftswachstums zu kontrollieren (Olasehinde-Williams, 2024). * **Industrieproduktion:** Indizes der Industrieproduktion (z.B. für energieintensive Sektoren)

werden von Eurostat und der Federal Reserve Bank of St. Louis (FRED) bezogen, um die Aktivität in den primär regulierten Sektoren genauer zu verfolgen. * **Bevölkerung:** Bevölkerungszahlen von Eurostat und dem U.S. Census Bureau werden verwendet, um pro-Kopf-Emissionen zu berechnen und demografische Entwicklungen zu berücksichtigen.

2.3.3 Energiedaten Die Struktur der Energieversorgung ist ein wesentlicher Treiber von Emissionen. Daher werden Daten zur Energieerzeugung und zum Energiemix herangezogen: * **Stromerzeugung nach Quelle:** Daten zum Anteil erneuerbarer Energien, Kohle, Gas und Kernkraft an der Stromerzeugung werden von Eurostat, der Internationalen Energieagentur (IEA) und der California Energy Commission (CEC) bezogen. Diese Daten sind wichtig, um den Effekt von Brennstoffwechseln (Fuel Switching) zu bewerten (He & Peng, 2024). * **Energiepreise:** Preise für Kohle, Erdgas und Strom (Großhandel) werden von Eurostat, der IEA und der U.S. Energy Information Administration (EIA) gesammelt, da diese die Anreize für emissionsreduzierende Investitionen direkt beeinflussen.

2.3.4 CO₂-Preise und Marktparameter Die Höhe und Volatilität des CO₂-Preises sind direkte Indikatoren für das Preissignal. * **EU ETS Zertifikatspreise:** Tägliche und monatliche Durchschnittspreise für EU Allowance (EUA) Futures werden von Finanzdatenanbietern (z.B. ICE Endex) und spezialisierten Datenbanken (z.B. Bloomberg) bezogen. * **California ETS Zertifikatspreise:** Ähnliche Daten für California Carbon Allowances (CCA) werden von CARB und Finanzdatenanbietern gesammelt. * **Auktionsergebnisse und Allokationsdaten:** Informationen über die Anzahl der versteigerten und kostenlos zugeteilten Zertifikate sowie die Gesamtzahl der verfügbaren Zertifikate (Cap) werden von den jeweiligen Regulierungsbehörden veröffentlicht (Garcia-Torea et al., 2021).

2.3.5 Sonstige Klimapolitikmaßnahmen Um den Einfluss von CO₂-Preissystemen isolieren zu können, ist es wichtig, den Effekt anderer relevanter Klimaschutzmaßnahmen zu kontrollieren. Dazu gehören beispielsweise Energieeffizienzstandards, Subventionen für erneuerbare Energien oder Verkehrspolitik. Informationen hierzu

werden aus nationalen Klimaberichten und Datenbanken wie der IEA Policies and Measures Database gesammelt.

2.3.6 Datenbereinigung und -validierung Alle gesammelten Daten werden einer umfassenden Bereinigung und Validierung unterzogen. Dies umfasst die Überprüfung auf fehlende Werte, Ausreißer und Inkonsistenzen. Fehlende Werte werden, wenn angemessen und methodisch vertretbar, mittels Interpolation oder Imputation behandelt. Die Daten werden harmonisiert und in ein einheitliches Format gebracht, um die Kompatibilität für die statistische Analyse zu gewährleisten. Die Zeitreihen werden auf Stationarität geprüft und gegebenenfalls transformiert (z.B. durch Logarithmierung oder Differenzierung), um die Annahmen der statistischen Modelle zu erfüllen. Die Datenaggregation erfolgt auf jährlicher Basis, um langfristige Trends zu erfassen und saisonale Schwankungen zu glätten.

2.4 Statistische Methoden zur Wirksamkeitsanalyse

Die quantitative Analyse der Klimaschutzwirkung erfordert den Einsatz robuster statistischer Methoden, die in der Lage sind, kausale Zusammenhänge zu identifizieren und potenzielle Störfaktoren zu kontrollieren. Angesichts der komplexen Natur von CO₂-Preissystemen und der Verfügbarkeit von Paneldaten (mehrere Einheiten über mehrere Zeitpunkte hinweg) werden primär ökonometrische Ansätze verwendet.

2.4.1 Paneldatenanalyse Die Hauptmethode zur Analyse der Wirksamkeit wird die Paneldatenanalyse sein. Dieser Ansatz ermöglicht es, sowohl zeitliche als auch querschnittliche Variationen in den Daten zu nutzen und die Heterogenität zwischen den beobachtungsrelevanten Einheiten zu berücksichtigen. Die Grundform des Modells kann wie folgt ausgedrückt werden:

$$Y_{it} = \beta_0 + \beta_1 \text{CarbonPrice}_{it} + \beta_2 \text{GDP}_{it} + \beta_3 \text{EnergyMix}_{it} + \alpha_i + \delta_t + \epsilon_{it}$$

Wobei: * Y_{it} die Treibhausgasemissionen der Einheit i zum Zeitpunkt t darstellt.

* CarbonPrice_{it} den CO₂-Preis oder eine Dummy-Variable für die Existenz eines CO₂-Preissystems. * GDP_{it} das Bruttoinlandsprodukt als Kontrollvariable für die Wirtschaftsleis-

tung. * EnergyMix_{it} den Anteil erneuerbarer Energien am Energiemix als Kontrollvariable. * α_i ein einheitsspezifischer fester Effekt, der unbeobachtete, zeitkonstante Heterogenität der Einheiten i erfasst (z.B. spezifische Industriekonfigurationen oder geografische Gegebenheiten). * δ_t ein zeitspezifischer fester Effekt, der unbeobachtete, einheitskonstante Schocks erfasst (z.B. globale Wirtschaftskrisen oder allgemeiner technologischer Fortschritt). * ϵ_{it} der Fehlerterm.

Die Verwendung von festen Effekten (Fixed Effects Model) ist hierbei von Vorteil, da sie unbeobachtete, aber zeitlich konstante Variablen auf Ebene der Länder oder Regionen kontrollieren, die die Emissionsentwicklung beeinflussen könnten (Ludwig, 2010). Dies ist besonders wichtig in einem vergleichenden Kontext, um die spezifischen Effekte des CO2-Preissystems besser zu isolieren. Die Wahl zwischen Fixed Effects und Random Effects Modellen wird mittels eines Hausman-Tests getroffen.

2.4.3 Robuste Schätzung und Sensitivitätsanalyse Um die Robustheit der Ergebnisse zu gewährleisten, werden verschiedene Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Dazu gehören: * **Alternative Definitionen der Variablen:** Beispielsweise die Verwendung von CO2-Preisen mit Verzögerung, um Trägheitseffekte zu berücksichtigen, oder die Verwendung von Emissionsintensitäten anstelle von absoluten Emissionen. * **Alternative Kontrollgruppen:** Für die DiD-Analyse könnten unterschiedliche Kontrollgruppen definiert werden, um die Sensitivität der Ergebnisse gegenüber der Auswahl der Vergleichsgruppe zu testen. * **Ausschluss von Ausreißern:** Die Analyse wird mit und ohne potenziellen Ausreißern durchgeführt, um deren Einfluss auf die Ergebnisse zu bewerten. * **Verschiedene Zeiträume:** Die Analyse wird für verschiedene Zeiträume durchgeführt, um die Stabilität der Ergebnisse über die Zeit zu prüfen. * **Panel-Granger-Kausalitätstests:** Diese Tests werden eingesetzt, um die bidirektionalen Beziehungen zwischen CO2-Preisen und Emissionen zu untersuchen und die Richtung der Kausalität besser zu verstehen.

2.4.4 Qualitative Kontextanalyse Ergänzend zu den quantitativen Methoden wird eine qualitative Kontextanalyse durchgeführt. Diese umfasst die detaillierte Unter-

suchung der Designmerkmale und der Implementierungsgeschichte der Fallstudien (Weiqi et al., 2018)(Kim, 2021). Dazu gehören: * **Regulatorische Anpassungen:** Analyse von Änderungen in den Regeln des EU ETS (z.B. Marktstabilitätsreserve, Anpassungen der Mengenobergrenze) und des California ETS (z.B. Erweiterung der Sektoren). * **Marktentwicklungen:** Untersuchung von Preisschwankungen und deren Ursachen (z.B. Wirtschaftskrisen, politische Unsicherheit) (Chen et al., 2025). * **Interaktion mit anderen Politiken:** Bewertung, wie die CO2-Preissysteme mit anderen nationalen und subnationalen Klimaschutzmaßnahmen interagieren (Dütschke et al., 2025).

Diese qualitative Analyse dient dazu, die quantitativen Ergebnisse zu interpretieren, unerwartete Befunde zu erklären und ein tieferes Verständnis der Wirkungsmechanismen zu entwickeln. Sie hilft auch, die Grenzen der kausalen Zuordnung zu erkennen und die Generalisierbarkeit der Ergebnisse kritisch zu reflektieren. Die Kombination von quantitativen und qualitativen Methoden gewährleistet eine umfassende und fundierte Bewertung der Klimaschutzwirkung von CO2-Preissystemen.

Der methodische Ansatz dieser Arbeit ist somit darauf ausgelegt, eine umfassende Bewertung der Klimaschutzwirkung von CO2-Preissystemen zu ermöglichen. Durch die sorgfältige Auswahl der Fallstudien, die Nutzung hochwertiger Daten und den Einsatz geeigneter statistischer und qualitativer Analysemethoden wird angestrebt, valide und politisch relevante Erkenntnisse zu gewinnen. Die Robustheit der Ergebnisse wird durch Sensitivitätsanalysen und die kritische Reflexion potenzieller Limitationen untermauert. Diese Methodik bildet die Grundlage für die Beantwortung der Forschungsfrage und trägt zur Evidenzbasis für eine effektive Klimapolitik bei.

Analyse

Die vorliegende Analyse widmet sich der detaillierten Untersuchung des Emissionshandels als zentrales Instrument der Klimapolitik. Im Fokus stehen dabei die Mechanismen,

die Effektivität und die Herausforderungen, die mit der Implementierung und Weiterentwicklung von CO₂-Handelssystemen verbunden sind. Angesichts der Dringlichkeit globaler Klimaschutzmaßnahmen ist es von entscheidender Bedeutung, die Funktionsweise und die empirisch belegten Wirkungen dieser marktgestützten Ansätze umfassend zu verstehen. Die Analyse gliedert sich in mehrere Kernbereiche: die Betrachtung der Emissionsreduktionen durch CO₂-Handel, die Untersuchung der komplexen Preisgestaltung und der zugrundeliegenden Marktmechanismen, eine detaillierte Auseinandersetzung mit ausgewählten Fallstudien wie dem EU ETS, dem kalifornischen System und dem chinesischen Emissionshandel, einen Vergleich des Emissionshandels mit anderen Klimaschutzinstrumenten sowie die Zusammenfassung der empirischen Belege für dessen Klimaschutzwirkung. Ziel ist es, ein fundiertes Bild der Leistungsfähigkeit und der Grenzen des Emissionshandels zu zeichnen und Implikationen für zukünftige politische Gestaltungen abzuleiten.

Emissionsreduktionen durch CO₂-Handel

Der Emissionshandel, insbesondere in Form von Cap-and-Trade-Systemen, stellt einen zentralen Pfeiler moderner Klimapolitik dar und zielt darauf ab, Treibhausgasemissionen kosteneffizient zu reduzieren (Timilsina, 2018). Das Grundprinzip basiert auf der Festlegung einer Obergrenze (Cap) für die Gesamtemissionen eines Sektors oder einer Volkswirtschaft, welche über die Zeit schrittweise abgesenkt wird. Innerhalb dieser Obergrenze werden Emissionszertifikate ausgegeben, die es den beteiligten Unternehmen erlauben, eine bestimmte Menge an CO₂-Äquivalenten zu emittieren. Diese Zertifikate können gehandelt werden, wodurch ein Marktpreis für Emissionen entsteht. Der Handel ermöglicht es Unternehmen, die ihre Emissionen kostengünstig reduzieren können, überschüssige Zertifikate zu verkaufen, während Unternehmen mit höheren Vermeidungskosten zusätzliche Zertifikate erwerben können. Dieser Mechanismus fördert die Reduktion dort, wo sie am günstigsten ist, und stellt somit ein Instrument zur Erreichung von Klimazielen zu minimierten volkswirtschaftlichen Kosten dar (Gronwald & Ketterer, 2009). Die Effizienz dieses Ansatzes resultiert aus der

Möglichkeit, dass die Unternehmen selbst die optimalen Strategien zur Emissionsminderung wählen können, anstatt durch staatliche Vorgaben eingeschränkt zu sein. Dadurch wird ein Anreiz für kontinuierliche Effizienzsteigerungen und technologische Innovationen geschaffen, die über das gesetzlich vorgeschriebene Minimum hinausgehen.

Die Effektivität des Emissionshandels bei der Erzielung von Emissionsreduktionen hängt von einer Reihe von Designelementen ab, die sorgfältig aufeinander abgestimmt sein müssen. Eine kritische Komponente ist die Höhe und die Glaubwürdigkeit des Caps. Ein zu hohes Cap, das über den erwarteten Business-as-usual-Emissionen liegt, führt zu einem Überangebot an Zertifikaten und einem niedrigen oder gar nicht vorhandenen CO₂-Preis, was den Anreiz zur Emissionsminderung untergräbt (Clò, 2011). Historische Erfahrungen, insbesondere in frühen Phasen des EU ETS, haben gezeigt, dass ein anfängliches Überangebot von Zertifikaten die Wirksamkeit des Systems erheblich beeinträchtigen kann, da der Markt nicht das notwendige Preissignal aussendet, um Investitionen in Dekarbonisierung zu stimulieren (Egenhofer et al., 2011). Daher ist eine kontinuierliche Anpassung und Verknappung des Caps entscheidend, um die ambitionierten Reduktionsziele zu erreichen. Die Verknappung des Caps signalisiert den Marktteilnehmern eine zukünftige Verschärfung der Emissionsauflagen und fördert somit vorausschauende Investitionen in kohlenstoffarme Technologien und Prozesse, was zur langfristigen Transformation der Wirtschaft beiträgt (Kim, 2021). Darüber hinaus muss die Glaubwürdigkeit des Caps durch klare politische Verpflichtungen und transparente Regeln untermauert werden, um Vertrauen bei den Marktteilnehmern zu schaffen und Fehlinvestitionen zu vermeiden.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Abdeckung des Systems, d.h., welche Sektoren und Treibhausgase einbezogen werden. Eine breitere Abdeckung erhöht die Effizienz, da mehr Reduktionsmöglichkeiten erschlossen werden können und die Wahrscheinlichkeit von Carbon Leakage innerhalb des Systems sinkt. Gleichzeitig können Sektor-spezifische Besonderheiten und Wettbewerbsverzerrungen bei einer zu breiten Abdeckung Herausforderungen darstellen, die eine differenzierte Behandlung erfordern könnten (Healy et al., 2018). Die Ein-

beziehung von Sektoren wie der Industrie, der Energiewirtschaft und zunehmend auch des Verkehrs und des Gebäudesektors in verschiedene Emissionshandelssysteme zeigt den politischen Willen, die Reichweite dieser Instrumente zu erweitern und eine umfassendere Dekarbonisierung zu fördern (Falanga et al., 2025). Die Ausweitung der Abdeckung muss jedoch sorgfältig geplant werden, um unerwünschte Nebeneffekte wie Carbon Leakage zu vermeiden, bei dem Unternehmen ihre Produktion in Regionen mit weniger strengen Emissionsauflagen verlagern, was die globalen Emissionen nicht reduziert, sondern lediglich verschiebt (Healy et al., 2018). Die Berücksichtigung von indirekten Emissionen und der gesamten Wertschöpfungskette kann die Wirkung weiter verstärken.

Die Anreizwirkung des CO₂-Preises ist der zentrale Mechanismus, durch den Emissionsreduktionen erzielt werden. Ein ausreichend hoher und stabiler CO₂-Preis schafft einen finanziellen Anreiz für Unternehmen, in emissionsmindernde Technologien zu investieren, Energieeffizienzmaßnahmen umzusetzen, auf kohlenstoffärmere Brennstoffe umzusteigen oder ihre Produktionsprozesse zu optimieren (Digitemie & Ekemezie, 2024). Dieser Preis internalisiert die externen Kosten der Umweltverschmutzung, die sonst von der Gesellschaft getragen würden, und macht sie zu einem direkten Kostenfaktor für die Emittenten. Studien haben gezeigt, dass die Einführung und Erhöhung von CO₂-Preisen zu signifikanten Verhaltensänderungen führen kann. Beispielsweise kann die Umstellung von Kohle auf Gas in der Stromerzeugung, die sogenannte Fuel Switching, bei einem entsprechenden CO₂-Preis wirtschaftlich attraktiv werden, da Gas eine geringere CO₂-Intensität aufweist (He & Peng, 2024). Darüber hinaus fördert der CO₂-Preis Innovationen in der Entwicklung und Implementierung neuer grüner Technologien, da diese einen Wettbewerbsvorteil gegenüber emissionsintensiveren Alternativen erhalten und somit die Marktdurchdringung beschleunigt wird (Anser et al., 2020). Die kontinuierliche Weiterentwicklung und Diffusion solcher Technologien ist entscheidend für eine tiefgreifende Dekarbonisierung.

Die Verteilung der Zertifikate spielt ebenfalls eine Rolle für die Effizienz und Akzeptanz eines Systems. Während eine anfängliche kostenlose Zuteilung (Grandfathering)

zur Akzeptanz bei den betroffenen Industrien beitragen und Wettbewerbsnachteile in Übergangsphasen abfedern kann, wird eine Versteigerung (Auctioning) der Zertifikate als ökonomisch effizienter angesehen (Weiqi et al., 2018). Die Versteigerung generiert Einnahmen für den Staat, die für weitere Klimaschutzmaßnahmen, zur Entlastung der Bürger oder zur Förderung von Innovationen verwendet werden können, was zu einer doppelten Dividende führen kann (Ohlendorf et al., 2020). Eine Kombination aus kostenloser Zuteilung und Versteigerung wird oft in Übergangsphasen gewählt, um die Wettbewerbsfähigkeit von energieintensiven Industrien zu schützen und gleichzeitig den Übergang zu einem vollständig marktgesteuerten System zu ermöglichen. Die Umstellung auf eine vorwiegende Versteigerung der Zertifikate, wie sie in späteren Phasen des EU ETS erfolgte, hat die Preisfindung und die Anreizwirkung verbessert, da sie eine transparentere und gerechtere Verteilung der Emissionsrechte ermöglicht (Kim, 2021). Eine transparente Gestaltung der Zuteilungsregeln ist dabei essenziell, um Korruption und Lobbyismus zu minimieren.

Die langfristige Perspektive des Emissionshandels erfordert eine kontinuierliche Anpassung und Weiterentwicklung. Das Cap muss in Einklang mit den sich entwickelnden Klimazielen stehen und die neuesten wissenschaftlichen Erkenntnisse berücksichtigen, um sicherzustellen, dass die Reduktionspfade ausreichend ambitioniert sind. Mechanismen zur Marktstabilisierung, wie die Marktstabilitätsreserve (MSR) im EU ETS, sind entscheidend, um übermäßige Preisvolatilität zu dämpfen und ein Mindestpreisniveau zu sichern, das die Investitionssicherheit erhöht (Holt & Shobe, 2016). Solche Mechanismen helfen, auf externe Schocks wie Wirtschaftskrisen, die die Nachfrage dämpfen, oder unerwartete technologische Durchbrüche, die das Angebot beeinflussen, zu reagieren. Die Flexibilität und Anpassungsfähigkeit des Systems sind daher Schlüsselfaktoren für seine dauerhafte Wirksamkeit und Akzeptanz. Die Fähigkeit, auf dynamische ökonomische und ökologische Bedingungen zu reagieren, ist ein wesentlicher Vorteil des Emissionshandels gegenüber statischeren Regulierungsansätzen, die oft nur träge auf Veränderungen reagieren können. Eine regelmäßige

Überprüfung und Anpassung der Systemparameter ist somit unerlässlich, um die Effektivität des Emissionshandels als dynamisches Klimaschutzinstrument zu gewährleisten.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der Emissionshandel das Potenzial hat, signifikante Emissionsreduktionen zu erzielen, indem er einen Preis für CO₂-Emissionen festlegt und so wirtschaftliche Anreize für Dekarbonisierung schafft. Die Wirksamkeit hängt jedoch stark von spezifischen Designmerkmalen ab, darunter ein ambitioniertes und glaubwürdiges Cap, eine breite Abdeckung relevanter Sektoren und Treibhausgase, eine effiziente Zuteilung der Zertifikate und robuste Marktstabilisierungsmechanismen. Die Erfahrungen aus verschiedenen Systemen weltweit liefern wertvolle Erkenntnisse für die weitere Optimierung und den Ausbau dieses Instruments im globalen Kampf gegen den Klimawandel. Die Kombination aus Flexibilität für die Unternehmen und einer festen Emissionsgrenze für die Gesellschaft macht den Emissionshandel zu einem leistungsstarken Werkzeug zur Erreichung von Klimazielen.

Preisgestaltung und Marktmechanismen

Die Preisgestaltung und die zugrundeliegenden Marktmechanismen sind das Herzstück eines jeden Emissionshandelssystems (ETS), da sie die zentralen Anreize für Emissionsreduktionen schaffen und die Effizienz des Systems maßgeblich bestimmen. Der Preis für Emissionszertifikate wird durch das Zusammenspiel von Angebot und Nachfrage auf dem Markt bestimmt, ähnlich wie bei jedem anderen Gut (Chen et al., 2025). Das Angebot an Zertifikaten wird primär durch das festgelegte Cap des Systems bestimmt, das die Gesamtmenge der erlaubten Emissionen definiert. Im Laufe der Zeit wird dieses Cap in der Regel abgesenkt, um die Emissionen zu reduzieren und somit das Angebot an Zertifikaten zu verknappen. Diese Verknappung ist entscheidend, um einen realen Wert für die Emissionsrechte zu schaffen und die Knappheit des Gutes “Emissionsrecht” zu reflektieren. Die Nachfrage nach Zertifikaten ergibt sich aus den Emissionsverpflichtungen der teilnehmenden Unternehmen. Jedes Unternehmen, das Emissionen oberhalb seiner

kostenlos zugeteilten oder erworbenen Zertifikate verursacht, muss zusätzliche Zertifikate kaufen, um seine Verpflichtungen zu erfüllen. Die Kosten für diese zusätzlichen Zertifikate fließen direkt in die betriebswirtschaftlichen Entscheidungen ein und beeinflussen die Investitionsstrategien der Unternehmen.

Die Zuteilung der Zertifikate ist ein entscheidendes Designelement, das die anfängliche Marktstruktur und die Preisfindung beeinflusst. Historisch gesehen wurde in vielen Systemen, wie im frühen EU ETS, ein Großteil der Zertifikate kostenlos an die Unternehmen zugeteilt (Grandfathering oder Benchmarking) (Egenhofer et al., 2011). Diese Methode sollte die Akzeptanz des Systems erhöhen und die Wettbewerbsfähigkeit der betroffenen Industrien in der Übergangsphase schützen. Allerdings kann eine übermäßige kostenlose Zuteilung zu einem Überangebot an Zertifikaten führen, was den CO₂-Preis drückt und die Anreizwirkung mindert, da der Druck zur Emissionsminderung abnimmt (Clò, 2011). Eine Alternative ist die Versteigerung (Auctioning) der Zertifikate, bei der Unternehmen die benötigten Zertifikate auf einer Auktion erwerben müssen. Die Versteigerung gilt als ökonomisch effizienter, da sie einen direkten Preisbildungsmechanismus etabliert, Einnahmen für den Staat generiert und die Gefahr eines Überangebots reduziert, während sie gleichzeitig eine transparente und faire Verteilung der Rechte ermöglicht (Kim, 2021). Viele etablierte Systeme sind daher im Laufe der Zeit zu einem höheren Anteil an Versteigerungen übergegangen, um die Effizienz und die fiskalischen Vorteile zu maximieren. Die Einnahmen aus der Versteigerung können strategisch genutzt werden, um die Energiewende zu finanzieren oder soziale Härten abzufedern.

Die Volatilität des CO₂-Preises ist eine inhärente Eigenschaft von Marktmechanismen und kann erhebliche Auswirkungen auf die Planungs- und Investitionssicherheit von Unternehmen haben. Externe Faktoren wie Wirtschaftskrisen, die die industrielle Produktion und damit die Emissionen reduzieren, Energiepreisschwankungen, die die Attraktivität bestimmter Brennstoffe verändern, politische Entscheidungen, die das Cap anpassen, oder technologische Entwicklungen, die neue Reduktionsmöglichkeiten eröffnen, können Angebot

und Nachfrage nach Zertifikaten stark beeinflussen und zu erheblichen Preisschwankungen führen (Chen et al., 2025). Ein zu niedriger CO₂-Preis entzieht den Anreiz für Investitionen in emissionsarme Technologien, da die Amortisationszeiten zu lang werden, während ein extrem hoher Preis die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen beeinträchtigen und zu unerwünschten Verwerfungen führen kann, insbesondere in energieintensiven Sektoren. Um diese Volatilität zu managen und ein gewisses Maß an Preisstabilität zu gewährleisten, wurden verschiedene Marktstabilisierungsmechanismen entwickelt. Diese Mechanismen sind entscheidend, um das Vertrauen der Investoren zu stärken und eine langfristige Planung zu ermöglichen.

Abbildung 2: Vereinfachter Fluss der Emissionshandel-Marktmechanismen

Anmerkung: Die Abbildung zeigt den vereinfachten Fluss der Marktmechanismen in einem Emissionshandelssystem. Die Regierung legt das Cap fest und teilt Zertifikate zu, die dann zwischen Unternehmen gehandelt werden, um einen CO₂-Preis zu bilden, der Anreize zur Emissionsreduktion schafft.

Einer der bekanntesten Mechanismen ist die Marktstabilitätsreserve (MSR), die im EU ETS implementiert wurde (Holt & Shobe, 2016). Die MSR passt das Angebot an Zertifikaten dynamisch an die Marktbedingungen an. Bei einem Überangebot an Zertifikaten, beispielsweise infolge einer Wirtschaftskrise, werden diese Zertifikate in die Reserve verschoben, wodurch das verfügbare Angebot reduziert und der Preis gestützt wird. Umgekehrt können bei einem zu geringen Angebot, das zu überhöhten Preisen führen könnte, Zertifikate aus der Reserve freigegeben werden, um Preise zu dämpfen. Solche Mechanismen sind entscheidend, um auf unvorhergesehene Entwicklungen zu reagieren und ein Mindestpreisniveau zu sichern, das für die langfristige Investitionsplanung unerlässlich ist. Ähnliche Mechanismen sind auch in anderen Systemen in Erwägung gezogen oder implementiert worden, um die Robustheit des Preissignals zu stärken und die Funktionsfähigkeit des Marktes zu gewährleisten. Die Transparenz der MSR-Regeln ist dabei von großer Bedeutung, um Spekulationen entgegenzuwirken.

Ein weiterer Ansatz zur Preisstabilisierung sind Preisuntergrenzen (Price Floors) und Preisobergrenzen (Price Ceilings) oder “Collar”-Mechanismen (Holt & Shobe, 2016). Eine Preisuntergrenze legt einen Mindestpreis fest, unter den der CO₂-Preis nicht fallen darf. Dies schützt Investitionen in Dekarbonisierungstechnologien vor einem Einbruch der Zertifikatspreise und sichert einen dauerhaften Anreiz zur Emissionsminderung. Eine Preisobergrenze hingegen begrenzt den maximalen Preis, den Unternehmen für Zertifikate zahlen müssen, um übermäßige Kostenbelastungen zu vermeiden, die die Wirtschaftlichkeit gefährden könnten. Solche Mechanismen können die Unsicherheit für Unternehmen reduzieren und gleichzeitig die fiskalische Einnahmenstabilität für Regierungen verbessern. Die genaue Ausgestaltung dieser Mechanismen erfordert jedoch eine sorgfältige Abwägung, um die Effizienz des Marktes nicht zu untergraben und gleichzeitig die Klimaziele zu erreichen. Ein zu enger Korridor könnte die Preisfindung zu stark einschränken, während ein zu weiter Korridor die gewünschte Stabilität nicht bietet.

Das Konzept des Bankings und Borrowings von Zertifikaten trägt ebenfalls zur Marktstabilität und Effizienz bei. Banking erlaubt es Unternehmen, nicht genutzte Zertifikate in zukünftige Perioden zu übertragen, was ihnen die Flexibilität gibt, Emissionsreduktionen zeitlich zu optimieren. Dies fördert eine langfristige Perspektive bei Investitionsentscheidungen und kann dazu beitragen, Preisschwankungen über die Zeit zu glätten, indem es das Angebot bei einem Überangebot in die Zukunft verlagert (Black, 2018). Unternehmen können so überschüssige Zertifikate ansammeln, um sie in Zeiten höherer Preise oder strengerer Caps zu nutzen. Borrowing hingegen erlaubt es, zukünftige Zertifikate vorzeitig zu nutzen, was jedoch in den meisten Systemen stark eingeschränkt oder gar nicht erlaubt ist, um die Integrität des Caps nicht zu gefährden und die Einhaltung der Reduktionspfade zu sichern. Die Möglichkeit des Bankings ist ein entscheidendes Merkmal, das den Emissionshandel von einer reinen Steuer unterscheidet und ihm eine dynamische Anpassungsfähigkeit verleiht.

Die Interaktion mit anderen Politikfeldern und externen Märkten ist ebenfalls von Bedeutung. Die Verknüpfung von Emissionshandelssystemen (Linkage) zwischen verschiede-

nen Jurisdiktionen, wie zwischen Kalifornien und Quebec, kann die Effizienz steigern, den Markt vergrößern und die Preisfindung verbessern, indem sie mehr Reduktionsmöglichkeiten erschließt und die Liquidität erhöht (Black, 2018). Allerdings erfordert eine solche Verknüpfung eine hohe Kompatibilität der Designelemente und eine enge politische Koordination, um Arbitrage-Möglichkeiten oder unerwünschte Verlagerungseffekte zu vermeiden. Darüber hinaus beeinflussen nationale und internationale Energie- und Wirtschaftspolitiken, wie etwa Subventionen für fossile Brennstoffe oder erneuerbare Energien, die Nachfrage nach Emissionszertifikaten und somit deren Preis (Olasehinde-Williams, 2024). Politische Unsicherheit bezüglich zukünftiger Klimaziele oder Regularien kann ebenfalls zu Preisvolatilität führen und die Investitionsbereitschaft dämpfen (Chen et al., 2025). Eine kohärente und konsistente Politik über verschiedene Sektoren und Regierungsbereiche hinweg ist daher essenziell für einen effektiven Emissionshandel.

Ein weiteres wichtiges Konzept in der Preisgestaltung ist die Rolle von Offsets oder Emissionsgutschriften aus Projekten außerhalb des ETS-Scopes. Diese Gutschriften können Unternehmen erwerben, um ihre Emissionsverpflichtungen zu erfüllen, was zusätzliche Reduktionsmöglichkeiten eröffnet, insbesondere in Entwicklungsländern (Waldegren, 2012). Dies kann die Gesamtkosten der Emissionsreduktion senken und Finanzmittel in Klimaschutzprojekte in anderen Regionen lenken. Allerdings müssen Offsets strenge Kriterien der Zusätzlichkeit und Permanenz erfüllen, um die Integrität des Gesamtsystems nicht zu gefährden (Salzman & Weisbach, 2024). Die Überprüfung der Qualität und Zusätzlichkeit von Offsets ist eine ständige Herausforderung, die sorgfältige Überwachung und robuste Verifizierungsmechanismen erfordert, um sicherzustellen, dass die Reduktionen real und nicht-doppelt gezählt sind (Cheong, 2025). Fehlende Integrität bei Offsets kann die Glaubwürdigkeit des gesamten Marktes untergraben.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Preisgestaltung im Emissionshandel ein komplexes Zusammenspiel von Cap-Niveau, Zuteilungsmechanismen, Marktstabilisierungsregeln und externen Faktoren ist. Ein gut funktionierender Markt mit einem

robusten Preissignal ist entscheidend für die Effektivität des Emissionshandels als Klimaschutzinstrument. Die Erfahrungen haben gezeigt, dass kontinuierliche Anpassungen der Marktmechanismen und eine proaktive Steuerung der Zertifikatsmenge notwendig sind, um die gewünschten Emissionsreduktionen kosteneffizient zu erzielen und gleichzeitig die Marktstabilität zu gewährleisten. Die Fähigkeit, auf dynamische Marktbedingungen zu reagieren und gleichzeitig langfristige Investitionssicherheit zu bieten, ist eine der größten Herausforderungen und gleichzeitig eine der größten Stärken des Emissionshandels, die ihn zu einem flexiblen und anpassungsfähigen Instrument macht.

Fallstudien

Die empirische Analyse von Emissionshandelssystemen in der Praxis liefert entscheidende Erkenntnisse über ihre Wirksamkeit, Herausforderungen und Best Practices. Drei prominente Beispiele, die in dieser Arbeit detailliert untersucht werden, sind das EU Emissionshandelssystem (EU ETS), das kalifornische Cap-and-Trade-Programm und das chinesische Emissionshandelssystem. Jedes dieser Systeme repräsentiert unterschiedliche Entwicklungsstadien, geografische Kontexte und politische Rahmenbedingungen, was einen umfassenden Vergleich ermöglicht und wertvolle Lehren für die zukünftige Gestaltung globaler Klimapolitik bietet. Die detaillierte Betrachtung dieser Fallstudien erlaubt es, die theoretischen Konzepte des Emissionshandels mit den realen Auswirkungen und Anpassungsprozessen in verschiedenen ökonomischen und politischen Systemen abzugleichen.

EU Emissionshandelssystem (EU ETS)

Das EU ETS ist das weltweit größte und älteste multinationale Emissionshandelssystem und wurde 2005 ins Leben gerufen, um die Treibhausgasemissionen in der Europäischen Union kosteneffizient zu reduzieren (Egenhofer et al., 2011). Es deckt derzeit etwa 40% der EU-Gesamtemissionen ab, einschließlich der Stromerzeugung, energieintensiver Industrien wie Stahl, Zement und Chemie sowie des innereuropäischen Luftverkehrs (Garcia-Torea et

al., 2021). Seit seiner Einführung hat das System mehrere Phasen durchlaufen, die jeweils auf die Verbesserung der Effektivität und die Behebung anfänglicher Schwächen abzielten und somit einen kontinuierlichen Lernprozess darstellten.

Entwicklungsphasen und Reformen: Die erste Phase (2005-2007) diente primär als Lernphase, in der die Infrastruktur des Handels etabliert wurde. Ein Hauptproblem dieser Phase war die übermäßige kostenlose Zuteilung von Zertifikaten, basierend auf überhöhten historischen Emissionsdaten, was zu einem Preisverfall und geringen Anreizen für Emissionsminderungen führte, da kein echtes Knappheitssignal erzeugt wurde (Clò, 2011). Die zweite Phase (2008-2012) fiel mit der ersten Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls zusammen und führte zu einer stärkeren Harmonisierung der Zuteilungsregeln und einer Reduzierung der Gesamtzertifikatsmenge. Trotzdem blieb das Problem des Überangebots bestehen, verschärft durch die Wirtschaftskrise von 2008, die zu einem Rückgang der industriellen Produktion und somit der Emissionen führte, wodurch die Nachfrage nach Zertifikaten sank (Egenhofer et al., 2011). Die dritte Phase (2013-2020) brachte wesentliche Reformen mit sich, darunter die Einführung eines EU-weiten Caps, das jährlich linear reduziert wird, und eine stärkere Verlagerung hin zur Versteigerung von Zertifikaten anstelle der kostenlosen Zuteilung, um die Effizienz zu steigern und Einnahmen zu generieren (Kim, 2021). Darüber hinaus wurde die Marktstabilitätsreserve (MSR) eingeführt, um auf das strukturelle Überangebot an Zertifikaten zu reagieren und die Preisvolatilität zu dämpfen (Holt & Shobe, 2016). Die MSR entzieht dem Markt überschüssige Zertifikate und legt sie in eine Reserve, um den Preis zu stützen und die Anreizwirkung zu verbessern, indem sie das Angebot flexibel an die Nachfrage anpasst. Die vierte Phase (ab 2021) zielt darauf ab, die Emissionsreduktionsziele weiter zu verschärfen, insbesondere im Lichte des Europäischen Green Deals und des Ziels der Klimaneutralität bis 2050. Das jährliche Reduktionsziel des Caps wurde von 2,2% auf 4,3% ab 2024 erhöht, und der Anwendungsbereich des ETS wird auf den Seeverkehr und ab 2027 auf Emissionen aus dem Straßenverkehr und dem Gebäudesektor (ETS2) ausgeweitet, was die Reichweite des Systems erheblich vergrößert und neue

Sektoren in die CO2-Bepreisung einbezieht (Falanga et al., 2025). Diese Erweiterung ist ein entscheidender Schritt zur Dekarbonisierung der gesamten europäischen Wirtschaft.

Auswirkungen auf Emissionen: Empirische Studien bestätigen, dass das EU ETS zu signifikanten Emissionsreduktionen beigetragen hat. Eine Meta-Analyse von Ex-post-Evaluierungen zeigt, dass das System die Emissionen in den abgedeckten Sektoren effektiv reduziert hat, insbesondere in den Phasen, in denen ein robuster CO2-Preis etabliert war (Döbbeling-Hildebrandt et al., 2024). Insbesondere in der Stromerzeugung hat das ETS den Übergang von Kohle zu emissionsärmeren Brennstoffen wie Gas und erneuerbaren Energien gefördert, da die Kohleverstromung durch den CO2-Preis teurer wurde (Klimko & Hasprová, 2025). Die Effektivität variierte jedoch in den verschiedenen Phasen, wobei die Wirkung in den späteren Phasen mit einem höheren und stabileren CO2-Preis ausgeprägter war, was die Bedeutung eines funktionierenden Preissignals unterstreicht (Kim, 2021). Trotz der Erfolge bleiben Herausforderungen. Das Risiko des Carbon Leakage, bei dem Unternehmen ihre Produktion in Länder mit weniger strengen Klimaregularien verlagern, wurde diskutiert und empirisch untersucht (Healy et al., 2018). Obwohl die tatsächlichen Effekte oft geringer waren als befürchtet, bleibt es ein relevantes Thema für bestimmte energieintensive Industrien. Um diesem entgegenzuwirken und gleiche Wettbewerbsbedingungen zu schaffen, hat die EU den Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) vorgeschlagen, der Importe aus Ländern ohne äquivalente CO2-Bepreisung bepreist und somit Anreize für globale Klimaschutzmaßnahmen schafft (Yang et al., 2024).

Tabelle 3: Entwicklung der Emissionsreduktionen und CO2-Preise im EU ETS (Phasen 1-4)

| Phase | Zeitraum | Cap- | Mittlerer | Emissionsänderung | Haupttreiber / |
|-------|-----------|-------------|------------------|----------------------------|----------------------------|
| | | Reduktion / | CO2-Preis | | |
| | Jahr | | (EUR/tCO2) | (relativ zum Start) | Anmerkungen |
| 1 | 2005-2007 | Variabel | 10-25 (später 0) | Gering (Überallokation) | Lernphase, Preisverfall |

| Phase | Zeitraum | Cap- | Mittlerer | Emissionsänderung (relativ zum Start) | Haupttreiber / Anmerkungen |
|-------|---------------|-----------------------|-------------------------|--|---|
| | | Reduktion / Jahr | CO2-Preis (EUR/tCO2) | | |
| 2 | 2008- 2012 | Variabel | 5-15 (später <5) | Moderat (Finanzkrise) | Überangebot, externe Schocks |
| 3 | 2013- 2020 | 1,74% | 5-30 | Signifikant (besonders Strom) | Cap- Verknappung, MSR- Ankündigung |
| 4 | 2021- 2030 | 2,2% (später 4,3%) | 50-100+ | Stark (Green Deal) | Erhöhte Ambition, MSR-Wirkung |

Anmerkung: Die Daten sind illustrative Schätzwerte, die auf der allgemeinen Literatur basieren und die Trends in den jeweiligen Phasen des EU ETS widerspiegeln. Der CO2-Preis variiert stark innerhalb der Phasen. [VERIFY]

Kalifornisches Cap-and-Trade-Programm

Das kalifornische Cap-and-Trade-Programm, das 2013 gestartet wurde, ist ein weiteres prominentes Beispiel für ein erfolgreiches Emissionshandelssystem in einer entwickelten Volkswirtschaft, insbesondere in Nordamerika (Black, 2018). Es wurde im Rahmen des “Global Warming Solutions Act” (AB 32) von 2006 etabliert und zielt darauf ab, die Treibhausgasemissionen des Staates bis 2020 auf das Niveau von 1990 und bis 2030 um 40% unter das Niveau von 1990 zu senken, was sehr ambitionierte Ziele darstellt.

Design und Abdeckung: Das System deckt etwa 85% der gesamten Treibhausgasemissionen Kaliforniens ab, einschließlich der Stromerzeugung, der Industrie, des Verkehrs und des Gebäudesektors (Black, 2018). Es ist somit umfassender als das EU ETS in Bezug auf

die Sektorenabdeckung, da es auch den Kraftstoffverbrauch und damit den Verkehrssektor direkt einbezieht, was einen Großteil der Emissionen adressiert. Die Zertifikate werden teilweise kostenlos zugeteilt, um die Akzeptanz bei den Unternehmen zu gewährleisten, und teilweise versteigert, wobei die Einnahmen aus den Versteigerungen in Klimaschutzprojekte investiert werden, die der Gemeinschaft zugutekommen und weitere Reduktionen fördern. Ein einzigartiges Merkmal des kalifornischen Systems ist seine Verknüpfung (Linkage) mit dem Cap-and-Trade-Programm der kanadischen Provinz Quebec seit 2014 (Black, 2018). Diese Verknüpfung schafft einen größeren und liquideren Markt für Emissionszertifikate, was die Effizienz steigert, die Preisfindung stabilisiert und die Anzahl der verfügbaren Reduktionsmöglichkeiten erhöht. Die erfolgreiche Verknüpfung dient als Modell für die zukünftige Integration weiterer Emissionshandelssysteme.

Wirksamkeit und Herausforderungen: Kalifornien hat seine Emissionsreduktionsziele, insbesondere das Ziel für 2020, erfolgreich erreicht [VERIFY: California Air Resources Board reports]. Studien zeigen, dass das Cap-and-Trade-Programm zusammen mit anderen Klimaschutzmaßnahmen des Staates, wie der Förderung erneuerbarer Energien und Effizienzstandards, maßgeblich zu diesem Erfolg beigetragen hat [VERIFY: UC Berkeley study on California climate policies]. Der CO₂-Preis hat Anreize für Investitionen in erneuerbare Energien, Energieeffizienz und die Reduzierung von Emissionen in der Industrie geschaffen, was zu einer Diversifizierung des Energiemixes und einer Reduzierung der Kohlenstoffintensität führte. Herausforderungen umfassen die Preisvolatilität, die trotz der Verknüpfung weiterhin auftreten kann, und die Notwendigkeit, das System kontinuierlich an neue Emissionsziele und politische Entwicklungen anzupassen. Die Integration von Offsets aus externen Projekten ist ebenfalls ein Thema, wobei strenge Regeln zur Gewährleistung der Zusätzlichkeit und Qualität angewendet werden, um die Umweltintegrität des Systems zu wahren (Salzman & Weisbach, 2024). Das kalifornische System dient oft als Modell für andere regionale oder nationale Emissionshandelssysteme, insbesondere aufgrund seiner breiten Abdeckung, der erfolgreichen Verknüpfung mit einem anderen System und der robusten Governance-Struktur.

China, als weltweit größter Emittent von Treibhausgasen, hat seit 2011 regionale Pilotprojekte für den Emissionshandel etabliert und im Jahr 2021 ein nationales ETS gestartet (Wei et al., 2024). Dies stellt einen entscheidenden Schritt in Chinas Klimapolitik dar und hat globale Implikationen, da es das Potenzial hat, die globalen Emissionen erheblich zu beeinflussen.

Entwicklung und Abdeckung: Die regionalen Pilotprojekte in Städten und Provinzen wie Peking, Shanghai, Shenzhen und Guangdong dienten als Testlabore für verschiedene Designelemente und Marktmechanismen, bevor ein nationales System implementiert wurde (Weiqi et al., 2018)(Hu et al., 2022). Diese Pilotprojekte deckten eine Vielzahl von Sektoren ab und sammelten wertvolle Erfahrungen, die in die Gestaltung des nationalen Systems einfließen, insbesondere im Hinblick auf Zuteilungsmethoden und MRV-Systeme (Messung, Berichterstattung, Verifizierung). Das nationale chinesische ETS startete zunächst mit der Abdeckung des Stromsektors, der für etwa 40% der chinesischen Gesamtemissionen verantwortlich ist (Wei et al., 2024). Dies ist eine strategische Entscheidung, da der Stromsektor eine der größten und am einfachsten zu regulierenden Emissionsquellen darstellt. Es ist geplant, das System schrittweise auf weitere Sektoren wie Zement, Aluminium und Stahl auszuweiten, um eine breitere Dekarbonisierung zu erreichen (He & Peng, 2024). Die anfängliche Zuteilung der Zertifikate erfolgt hauptsächlich kostenlos, basierend auf Benchmarking, um die Akzeptanz bei den Unternehmen zu fördern und Wettbewerbsnachteile in der Anfangsphase zu minimieren (Weiqi et al., 2018). Dies spiegelt einen pragmatischen Ansatz wider, der darauf abzielt, die Industrie nicht zu überfordern.

Herausforderungen und Potenzial: Das chinesische ETS steht vor einzigartigen Herausforderungen, die sich aus der Größe der Volkswirtschaft, der Dominanz staatlicher Unternehmen und der Notwendigkeit einer schnellen Dekarbonisierung ergeben. Die Verlässlichkeit der Emissionsdaten, die Einhaltung der Vorschriften und die Entwicklung eines liquiden und stabilen Zertifikatemarktes sind entscheidende Faktoren für den Erfolg (Wei et

et al., 2024). Die Datenqualität und die Durchsetzung der Regeln sind in einem so großen und heterogenen System besonders anspruchsvoll. Darüber hinaus muss der Markt genügend Liquidität entwickeln, um eine effiziente Preisfindung zu ermöglichen. Trotz dieser Herausforderungen zeigt das chinesische ETS ein enormes Potenzial. Es sendet ein klares Preissignal für CO₂-Emissionen an einen der größten Emittenten der Welt und kann massive Investitionen in grüne Technologien und Energieeffizienz anstoßen, was für die globale Klimaschutzarbeit von entscheidender Bedeutung ist (Chen et al., 2025). Die Erfahrungen aus den Pilotprojekten zeigen, dass der Emissionshandel in China das Potenzial hat, Unternehmen zu Emissionsreduktionen zu bewegen und die Kohlenstoffintensität der Produktion zu senken (Hu et al., 2022). Die weitere Entwicklung des Systems, insbesondere die Erweiterung der Sektorenabdeckung, die Stärkung der Marktmechanismen und die Verbesserung der Governance, wird entscheidend sein, um Chinas ambitionierte Klimaziele zu erreichen und einen substanziellen Beitrag zur globalen Dekarbonisierung zu leisten.

Zusammenfassend zeigen die Fallstudien, dass Emissionshandelssysteme ein wirksames Instrument zur Emissionsreduktion sein können, wenn sie gut konzipiert und kontinuierlich angepasst werden. Die Erfahrungen aus dem EU ETS, Kalifornien und China unterstreichen die Bedeutung eines ambitionierten Caps, robuster Marktmechanismen und der Anpassungsfähigkeit an spezifische nationale und regionale Kontexte. Gleichzeitig machen sie deutlich, dass die Implementierung und Weiterentwicklung solcher Systeme ein komplexer und dynamischer Prozess ist, der ständige politische Unterstützung, technische Expertise und die Bereitschaft zur fortlaufenden Reform erfordert. Die unterschiedlichen Ansätze und Erfolge in diesen Systemen bieten eine reiche Grundlage für das Lernen und die Verbesserung zukünftiger Emissionshandelssysteme weltweit.

Vergleich mit anderen Klimaschutzinstrumenten

Der Emissionshandel ist eines von mehreren Instrumenten, die zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen eingesetzt werden können. Ein umfassendes Verständnis

seiner Stärken und Schwächen erfordert einen Vergleich mit alternativen oder ergänzenden Politikansätzen, insbesondere CO₂-Steuern, ordnungsrechtlichen Vorschriften (Command-and-Control), Subventionen und freiwilligen Vereinbarungen. Jedes dieser Instrumente hat spezifische Charakteristika, die es für unterschiedliche Kontexte und Ziele mehr oder weniger geeignet machen, und eine optimale Klimapolitik erfordert oft eine Kombination dieser Ansätze.

Emissionshandel vs. CO₂-Steuer

Der Vergleich zwischen Emissionshandel und CO₂-Steuer ist ein zentrales Thema in der ökonomischen Klimapolitik, da beide Instrumente auf der Bepreisung von CO₂-Emissionen basieren und Marktmechanismen nutzen, um Anreize zur Emissionsminderung zu schaffen. Der Hauptunterschied liegt in der Steuerungsgröße: Der Emissionshandel steuert die Menge der Emissionen (Cap), indem er die Anzahl der verfügbaren Zertifikate begrenzt, während die CO₂-Steuer den Preis steuert, indem sie einen festen Betrag pro emittierter Tonne CO₂ festlegt (Hautes et al., 2018)(Timilsina, 2018).

Vorteile des Emissionshandels:

- **Emissionssicherheit:** Der Emissionshandel garantiert die Einhaltung eines bestimmten Emissionsziels (Cap), da die Gesamtmenge der Zertifikate fix ist. Dies ist ein entscheidender Vorteil, wenn ein spezifisches Reduktionsziel erreicht werden muss, wie es bei internationalen Klimaabkommen der Fall ist, und bietet Planungssicherheit für die Erreichung von Klimazielen (Gronwald & Ketterer, 2009).
- **Kosteneffizienz:** Durch den Handel mit Zertifikaten wird die Emissionsreduktion dort realisiert, wo sie am günstigsten ist, was zu minimierten volkswirtschaftlichen Kosten führt, da Unternehmen selbst die kostengünstigsten Reduktionspfade wählen können (Digitomie & Ekemezie, 2024).
- **Innovation:** Der Marktpreis für CO₂ fördert langfristig Innovationen in emissionsarmen Technologien, da diese einen Wettbewerbsvorteil erhalten und die Forschung und Entwicklung in diesem Bereich stimuliert wird (Anser et al., 2020).

Nachteile des Emissionshandels: - **Preisvolatilität:** Der CO₂-Preis kann starken Schwankungen unterliegen, was die Planungs- und Investitionssicherheit für Unternehmen beeinträchtigen kann und somit das Risiko für Investitionen in emissionsarme Technologien erhöht (Chen et al., 2025). Mechanismen wie die Marktstabilitätsreserve oder Preisuntergrenzen können dem entgegenwirken, sind aber komplex in der Gestaltung und erfordern eine sorgfältige Kalibrierung (Holt & Shobe, 2016). - **Komplexität:** Die Einrichtung und Verwaltung eines Emissionshandelssystems ist komplex und erfordert eine robuste Infrastruktur für Messung, Berichterstattung und Verifizierung (MRV-Systeme) sowie eine effektive Marktüberwachung, was hohe administrative Kosten verursachen kann (Herman, 2024). - **Verteilungswirkungen:** Die kostenlose Zuteilung von Zertifikaten kann zu unerwarteten Gewinnen (Windfall Profits) führen, während eine Versteigerung Verteilungswirkungen haben kann, die durch Kompensationsmaßnahmen abgefedert werden müssen, um soziale Ungleichheiten nicht zu verstärken (Ohlendorf et al., 2020).

Vorteile der CO₂-Steuer: - **Preissicherheit:** Eine CO₂-Steuer bietet Preissicherheit für Unternehmen, da der Preis pro Tonne CO₂ feststeht. Dies erleichtert die langfristige Planung und Investitionen und reduziert das Risiko für Unternehmen (Haites et al., 2018). - **Einfachheit:** CO₂-Steuern sind oft einfacher zu implementieren und zu verwalten als Emissionshandelssysteme, insbesondere in Sektoren mit vielen kleinen Emittenten, da keine komplexen Zuteilungs- und Handelssysteme erforderlich sind (Batini et al., 2020). - **Einnahmen:** Eine CO₂-Steuer generiert stabile Einnahmen für den Staat, die für andere Zwecke, wie die Förderung von erneuerbaren Energien, die Entlastung der Bürger oder die Finanzierung von Klimaanpassungsmaßnahmen, verwendet werden können (Ohlendorf et al., 2020).

Nachteile der CO₂-Steuer: - **Emissionsunsicherheit:** Eine CO₂-Steuer garantiert kein bestimmtes Emissionsreduktionsziel. Die tatsächliche Reduktion hängt von der Höhe der Steuer und der Preiselastizität der Emissionen ab, die schwer vorherzusagen sein kann (Haites et al., 2018). - **Politische Akzeptanz:** Höhere Steuern können auf politischen Widerstand stoßen, insbesondere wenn sie als Belastung für Bürger und

Unternehmen wahrgenommen werden, was ihre Durchsetzbarkeit erschwert (Dütschke et al., 2025).

In der Praxis werden beide Instrumente oft kombiniert oder in unterschiedlichen Sektoren eingesetzt. So kann ein Emissionshandelssystem für große Emittenten wie die Industrie und Energieversorgung existieren, während eine CO₂-Steuer für den Wärme- und Verkehrssektor angewendet wird, wie es in Deutschland der Fall ist, um die jeweiligen Stärken in verschiedenen Kontexten zu nutzen (Capozza & Curtin, 2012).

Tabelle 4: Vergleich von Emissionshandel und CO₂-Steuer

| Merkmal | Emissionshandel (ETS) | CO ₂ -Steuer (Carbon Tax) |
|----------------------|---|---|
| Steuerungsgröße | Menge (Cap) | Preis (Steuersatz) |
| Emissionssicherheit | Hoch (Cap wird erreicht) | Unsicher (abhängig von Elastizität) |
| Preissicherheit | Gering (volatil) | Hoch (festgelegter Preis) |
| Kosteneffizienz | Hoch (Markt findet günstigste Red.) | Hoch (wenn Steuersatz optimal) |
| Komplexität | Hoch (MRV, Allokation, Marktmechanismen) | Gering (einfacher zu implementieren) |
| Einnahmen | Variabel (Auktionen) | Stabil (Steuereinnahmen) |
| Innovationsanreize | Stark (langfristiges Preissignal) | Stark (konstanter Kostenfaktor) |
| Verteilungswirkungen | Können regressiv sein (Kompensation nötig) | Können regressiv sein (Kompensation nötig) |

Anmerkung: Der Vergleich hebt die Kernunterschiede und jeweiligen Stärken und Schwächen von Emissionshandel und CO₂-Steuer hervor. Beide Instrumente sind markt-basiert und zielen auf die Internalisierung externer Kosten ab.

Ordnungsrechtliche Vorschriften (Command-and-Control)

Ordnungsrechtliche Vorschriften, auch bekannt als Command-and-Control-Ansätze, umfassen direkte Regulierungen wie Emissionsstandards, Technologievorschriften oder Verbote. Beispiele hierfür sind Emissionsgrenzwerte für Kraftwerke, Effizienzstandards für Fahrzeuge oder Gebäude oder das Verbot bestimmter umweltschädlicher Substanzen. Sie stellen eine traditionelle Form der Umweltregulierung dar.

Vorteile:

- **Direkte Wirkung:** Sie können schnelle und garantierte Reduktionen erzwingen, insbesondere bei bekannten Schadstoffen oder Technologien, bei denen eine schnelle Reaktion erforderlich ist.
- **Einfache Durchsetzung:** Die Einhaltung kann relativ einfach überwacht und bei Nichteinhaltung sanktioniert werden, was eine hohe Rechtssicherheit bietet.
- **Geringe Unsicherheit:** Sie bieten eine hohe Sicherheit bezüglich der Umsetzung bestimmter Maßnahmen, da die Anforderungen klar definiert sind.

Nachteile:

- **Inflexibilität und Ineffizienz:** Command-and-Control-Ansätze sind oft unflexibel und berücksichtigen nicht die unterschiedlichen Vermeidungskosten der Unternehmen. Dies führt dazu, dass die Reduktionen nicht dort erfolgen, wo sie am kostengünstigsten sind, was die Gesamtkosten für die Gesellschaft erhöht und somit ökonomisch ineffizient ist (Ekarth & Hennig, 2011).
- **Keine Innovationsanreize:** Sie schaffen oft keine Anreize für Innovationen über das vorgeschriebene Maß hinaus. Sobald die Standards erfüllt sind, gibt es keinen weiteren Anreiz zur Verbesserung oder zur Entwicklung bahnbrechender Technologien.
- **Informationsasymmetrie:** Die Regulierungsbehörden benötigen detaillierte Informationen über Technologien und Kosten, um effiziente Standards festzulegen, was oft schwierig ist und zu suboptimalen Regulierungen führen kann.

Im Vergleich zum Emissionshandel sind Command-and-Control-Ansätze weniger effizient, da sie den Marktmechanismus zur Kostenoptimierung nicht nutzen. Sie können jedoch eine wichtige Rolle spielen, wenn es um die Festlegung von Mindeststandards, die Gewährleistung von Sicherheit oder die Bewältigung spezifischer Umweltprobleme geht, bei denen ein Preisinstrument allein nicht ausreicht oder zu langsam wirkt.

Subventionen und Förderprogramme

Subventionen und Förderprogramme unterstützen die Einführung von klimafreundlichen Technologien oder Praktiken, indem sie finanzielle Anreize bieten. Beispiele sind Subventionen für erneuerbare Energien, Energieeffizienzmaßnahmen oder Elektromobilität. Sie zielen darauf ab, die Markteinführung neuer Technologien zu beschleunigen und Hindernisse zu überwinden.

Vorteile: - **Förderung neuer Technologien:** Subventionen können dazu beitragen, dass sich neue, noch nicht marktreife Technologien etablieren und Skaleneffekte erzielen, indem sie die anfänglichen Investitionskosten senken. - **Politische Akzeptanz:** Sie sind oft politisch populärer als Steuern oder Emissionshandel, da sie als “Belohnung” und nicht als “Bestrafung” wahrgenommen werden, was die Durchsetzbarkeit erleichtert. - **Gezielte Förderung:** Sie ermöglichen eine gezielte Förderung bestimmter Sektoren oder Technologien, die als strategisch wichtig für die Energiewende erachtet werden.

Nachteile: - **Kostenintensiv:** Subventionen können sehr teuer sein und eine erhebliche Belastung für den Staatshaushalt darstellen, insbesondere wenn sie über lange Zeiträume aufrechterhalten werden. - **Mitnahmeeffekte:** Es besteht das Risiko von Mitnahmeeffekten, bei denen Projekte subventioniert werden, die auch ohne Förderung realisiert worden wären, was die Effizienz der Subventionen mindert (Salzman & Weisbach, 2024). - **Verzerrung des Wettbewerbs:** Sie können den Wettbewerb verzerren und zu Ineffizienzen führen, indem sie bestimmte Technologien gegenüber anderen bevorzugen, anstatt einen technologieoffenen Wettbewerb zu fördern. - **Kein Preis auf Emissionen:** Subventionen setzen keinen direkten Preis auf Emissionen und bieten daher keinen umfassenden Anreiz zur Reduktion über alle Sektoren hinweg, sondern nur für die geförderten Bereiche.

Subventionen können den Emissionshandel ergänzen, indem sie die Entwicklung und Verbreitung von emissionsarmen Technologien beschleunigen und so die Vermeidungskosten senken, was wiederum den CO₂-Preis im Emissionshandel beeinflussen kann. Sie sollten

jedoch sorgfältig konzipiert werden, um Ineffizienzen und Mitnahmeeffekte zu vermeiden und eine Exit-Strategie für die Beendigung der Förderung zu haben.

Freiwillige Vereinbarungen

Freiwillige Vereinbarungen sind Absprachen zwischen Regierungen und Unternehmen oder Industrieverbänden, in denen sich Unternehmen verpflichten, bestimmte Umweltziele zu erreichen, ohne dass dies gesetzlich vorgeschrieben ist. Sie basieren auf dem Prinzip der Selbstregulierung und Kooperation.

Vorteile: - **Flexibilität:** Sie bieten den Unternehmen eine hohe Flexibilität bei der Wahl der Maßnahmen zur Zielerreichung. - **Geringere Transaktionskosten:** Die Implementierung kann weniger bürokratisch sein als bei regulativen Instrumenten, da weniger staatliche Überwachung erforderlich ist. - **Akzeptanz:** Sie können eine hohe Akzeptanz bei den beteiligten Unternehmen finden, da sie gemeinsam mit der Industrie entwickelt werden (Becker & Richter, 2015).

Nachteile: - **Geringe Wirksamkeit:** Ihre Wirksamkeit ist oft begrenzt, da die Ziele nicht verbindlich sind und es an robusten Durchsetzungsmechanismen mangelt, was zu einer Unterschreitung der Potenziale führen kann (Becker & Richter, 2015). - **Mitnahmeeffekte:** Es besteht ein hohes Risiko von Mitnahmeeffekten, da Unternehmen möglicherweise nur Maßnahmen zusagen, die sie ohnehin umgesetzt hätten, um ihr öffentliches Image zu verbessern. - **Transparenzmangel:** Die Überwachung und Berichterstattung kann unzureichend sein, was die Überprüfung der tatsächlichen Erfolge erschwert.

Freiwillige Vereinbarungen sind in der Regel weniger effektiv als marktbasierte Instrumente oder ordnungsrechtliche Vorschriften, können aber in bestimmten Nischen, als erste Schritte zur Bewusstseinsbildung oder zur Ergänzung strengerer Politiken nützlich sein. Sie können auch als Plattform für den Dialog zwischen Staat und Wirtschaft dienen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der Emissionshandel im Vergleich zu anderen Klimaschutzinstrumenten eine einzigartige Kombination aus Kosteneffizienz und

Emissionssicherheit bietet. Während CO₂-Steuern Preissicherheit gewährleisten, ist der Emissionshandel überlegen, wenn ein bestimmtes Emissionsziel absolut erreicht werden muss. Ordnungsrechtliche Vorschriften sind effektiv für Mindeststandards, aber ineffizient in der Kostenverteilung. Subventionen können Innovationen fördern, sind aber teuer und anfällig für Mitnahmeeffekte. Freiwillige Vereinbarungen sind am wenigsten wirksam. Eine effektive Klimapolitik erfordert oft einen Mix aus verschiedenen Instrumenten, die auf die spezifischen Sektoren und Emissionsquellen zugeschnitten sind und die jeweiligen Stärken nutzen, um die Gesamtwirkung zu maximieren. Der Emissionshandel ist dabei als übergeordnetes Instrument zur Steuerung der Gesamtmenge der Emissionen oft am besten geeignet, insbesondere für große Punktquellen und eine breite sektoralen Abdeckung.

Empirische Belege für Klimaschutzwirkung

Die empirische Forschung spielt eine entscheidende Rolle bei der Bewertung der tatsächlichen Klimaschutzwirkung von Emissionshandelssystemen. Zahlreiche Studien haben sich der Aufgabe gewidmet, die Effektivität dieser marktgestützten Instrumente anhand realer Daten zu analysieren. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind vielfältig, zeigen aber im Großen und Ganzen eine positive Korrelation zwischen der Implementierung von CO₂-Preissignalen und der Reduzierung von Treibhausgasemissionen. Diese Evidenz ist entscheidend, um die Legitimität und Effektivität des Emissionshandels als Klimaschutzinstrument zu untermauern und seine Weiterentwicklung zu informieren.

Eine der umfassendsten Formen der empirischen Evidenz sind Ex-post-Evaluierungen, die die tatsächlichen Emissionsentwicklungen nach der Einführung eines ETS untersuchen. Eine systematische Überprüfung und Meta-Analyse von Ex-post-Evaluierungen des EU ETS hat beispielsweise ergeben, dass das System zu einer signifikanten Reduktion der Emissionen in den abgedeckten Sektoren geführt hat (Döbbeling-Hildebrandt et al., 2024). Diese Studien verwendeten verschiedene ökonometrische Methoden, wie zum Beispiel Difference-in-Differences-Ansätze, um den kausalen Effekt des ETS von anderen Einflussfaktoren wie

Wirtschaftswachstum, Energiepreisen oder anderen parallel eingeführten politischen Maßnahmen zu isolieren. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass der CO₂-Preis als klarer finanzieller Anreiz für Unternehmen gewirkt hat, ihre Emissionen zu senken und in kohlenstoffärmere Produktionsprozesse zu investieren.

Insbesondere in der Stromerzeugung wurde eine klare und messbare Wirkung des EU ETS beobachtet. Der CO₂-Preis hat die relativen Kosten der Stromerzeugung aus fossilen Brennstoffen, insbesondere Kohle, im Vergleich zu emissionsärmeren Alternativen wie Erdgas oder erneuerbaren Energien verändert (Klimko & Hasprová, 2025). Dies hat zu einem sogenannten “Fuel Switching” geführt, bei dem Stromversorger von Kohle auf Gas umgestiegen sind, wenn der CO₂-Preis hoch genug war, um die Kostendifferenz auszugleichen und Gas wirtschaftlich attraktiver zu machen. Langfristig fördert der CO₂-Preis auch Investitionen in erneuerbare Energien und Energieeffizienz, da diese Technologien wettbewerbsfähiger werden und somit die Dekarbonisierung des Energiesektors vorantreiben (Kim, 2021). Die Umstellung auf erneuerbare Energien wird durch den Emissionshandel zusätzlich begünstigt, indem die externen Kosten fossiler Energieträger internalisiert werden.

Auch außerhalb des EU ETS gibt es überzeugende empirische Belege. Studien zum kalifornischen Cap-and-Trade-Programm zeigen ebenfalls, dass es einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung der Emissionsreduktionsziele des Staates geleistet hat [VERIFY: Empirical studies on California ETS effectiveness]. Die Kombination aus einem robusten Cap, der Versteigerung von Zertifikaten und der Verknüpfung mit dem Quebecer System hat zu einem stabilen CO₂-Preis und entsprechenden Reduktionsanreizen geführt, die sich in tatsächlichen Emissionsminderungen niederschlugen. In China, wo das nationale ETS noch relativ jung ist, haben die Erfahrungen aus den regionalen Pilotprojekten gezeigt, dass der Emissionshandel das Potenzial hat, Unternehmen zu Emissionsreduktionen zu motivieren und die Kohlenstoffintensität zu reduzieren (Hu et al., 2022). Erste Analysen des nationalen Systems deuten darauf hin, dass es begonnen hat, ein Preissignal zu senden, das die Dekarbonisierung im

Energiesektor vorantreibt und somit einen wichtigen Schritt zur Erreichung der nationalen Klimaziele darstellt (Wei et al., 2024).

Ein weiterer wichtiger Bereich der empirischen Forschung ist die Untersuchung der Auswirkungen von Carbon Pricing auf die makroökonomische Leistung. Während Kritiker oft Bedenken hinsichtlich negativer Auswirkungen auf Wirtschaftswachstum und Beschäftigung äußern, zeigen Studien, dass die Effekte bei einer geschickten Politikgestaltung oft moderat oder sogar positiv sein können (Olasehinde-Williams, 2024). Insbesondere wenn die Einnahmen aus der CO₂-Bepreisung zur Senkung anderer Steuern (z.B. Einkommens- oder Unternehmenssteuern) oder zur Förderung von Innovationen verwendet werden, können die negativen Auswirkungen minimiert oder positive Effekte erzielt werden (Doppelte Dividende) (Ohlendorf et al., 2020). Dies deutet darauf hin, dass die Art und Weise, wie die Einnahmen recycelt werden, entscheidend für die gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen ist.

Herausforderungen in der empirischen Forschung bestehen in der Isolierung des kausalen Effekts des Emissionshandels von anderen gleichzeitig wirkenden Faktoren. Viele Länder und Regionen implementieren eine Vielzahl von Klimaschutzmaßnahmen parallel, wie Subventionen für erneuerbare Energien oder Effizienzstandards, was es schwierig macht, die spezifische Wirkung eines einzelnen Instruments genau zu quantifizieren. Daher verwenden Forscher komplexe ökonometrische Modelle, wie Difference-in-Differences-Ansätze oder synthetische Kontrollmethoden, um vergleichbare Kontrollgruppen zu schaffen und Störfaktoren zu kontrollieren. Die Robustheit der Ergebnisse hängt stark von der Qualität der Daten und der Angemessenheit der verwendeten Methoden ab, und Unsicherheiten bleiben bestehen.

Die Diskussion um Carbon Leakage, also die Verlagerung von Emissionen und Produktion in Länder ohne vergleichbare CO₂-Bepreisung, ist ein weiteres Feld der empirischen Analyse. Studien zum EU ETS haben gezeigt, dass das Risiko von Carbon Leakage in der Praxis geringer war als ursprünglich befürchtet, insbesondere aufgrund der Schutzmaßnahmen wie der kostenlosen Zuteilung für bestimmte Sektoren oder der Anpassung der Bench-

marks (Healy et al., 2018). Dennoch bleibt es ein relevantes Thema, insbesondere für energieintensive Industrien, und wird durch Instrumente wie den Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) weiter adressiert, der darauf abzielt, gleiche Wettbewerbsbedingungen zu schaffen und globale Klimaschutzmaßnahmen zu fördern (Yang et al., 2024).

Die langfristige Perspektive der empirischen Evidenz zeigt, dass die Wirksamkeit des Emissionshandels mit der Zeit und mit der Reifung der Systeme zunimmt. Frühe Phasen mit einem Überangebot an Zertifikaten und niedrigen Preisen zeigten oft geringere Reduktionseffekte, da der Anreiz zur Emissionsminderung fehlte (Clò, 2011). Mit der Einführung von Reformen, der Verknappung des Caps und der Etablierung von Marktstabilisierungsmechanismen hat sich die Effektivität jedoch deutlich verbessert, was zu einem stärkeren Preissignal und somit zu größeren Emissionsminderungen führte. Dies unterstreicht die Notwendigkeit einer kontinuierlichen Anpassung und ambitionierten Weiterentwicklung der Emissionshandelssysteme, um ihre volle Wirkung entfalten zu können.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass eine wachsende und robuste empirische Evidenzbasis die Klimaschutzwirkung des Emissionshandels untermauert. Während die genaue Quantifizierung des Effekts komplex ist und von den spezifischen Designmerkmalen und dem externen Umfeld abhängt, zeigen die meisten Studien, dass Emissionshandelssysteme ein effektives Instrument zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen sind. Sie fördern technologische Innovationen, treiben den Fuel Switching voran und tragen zur Dekarbonisierung der Wirtschaft bei, indem sie die Kosten von Emissionen internalisieren. Die gewonnenen Erkenntnisse aus den verschiedenen Fallstudien und Meta-Analysen sind von entscheidender Bedeutung für die Gestaltung zukünftiger Klimapolitik und die Weiterentwicklung bestehender Systeme, um die globalen Klimaziele effizient und effektiv zu erreichen.

Die vorliegende Analyse hat die vielfältigen Aspekte des Emissionshandels beleuchtet, von seinen grundlegenden Mechanismen über die Preisgestaltung bis hin zu den empirischen Belegen seiner Klimaschutzwirkung. Es wurde deutlich, dass der Emissionshandel ein po-

tentes, marktgestütztes Instrument zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen darstellt, dessen Wirksamkeit jedoch maßgeblich von einer intelligenten und dynamischen Politikgestaltung abhängt. Die Erfahrungen aus etablierten Systemen wie dem EU ETS und Kalifornien sowie dem aufstrebenden chinesischen ETS liefern wertvolle Lehren für die Optimierung und Skalierung dieses Instruments im globalen Kampf gegen den Klimawandel. Die Fähigkeit, Emissionen kosteneffizient zu senken und gleichzeitig Anreize für Innovationen zu schaffen, macht den Emissionshandel zu einem unverzichtbaren Bestandteil eines umfassenden Klimaschutzinstrumentenmixes. Die kontinuierliche Anpassung an neue wissenschaftliche Erkenntnisse und politische Ambitionen wird entscheidend sein, um die langfristigen Klimaziele zu erreichen.

Diskussion

Die vorliegende Arbeit untersuchte die Effektivität und die Herausforderungen von CO₂-Märkten als zentrales Instrument der Klimapolitik, wobei ein besonderer Schwerpunkt auf ihre Implikationen, Grenzen und das Potenzial für zukünftige Verbesserungen gelegt wurde. Die Ergebnisse der Analyse, die in den vorhergehenden Abschnitten präsentiert wurden, deuten darauf hin, dass CO₂-Märkte, insbesondere Emissionshandelssysteme (EHS), ein mächtiges, wenn auch komplexes Instrument zur Reduktion von Treibhausgasemissionen darstellen können. Ihre Wirksamkeit hängt jedoch maßgeblich von einer robusten Ausgestaltung, politischer Stabilität und der Fähigkeit ab, sich an dynamische wirtschaftliche und technologische Rahmenbedingungen anzupassen (Kim, 2021)(Timilsina, 2018). Diese Diskussion vertieft die gewonnenen Erkenntnisse, indem sie die weitreichenden Implikationen für die Klimapolitik beleuchtet, kritische Grenzen und Herausforderungen des Emissionshandels aufzeigt, konkrete Verbesserungsvorschläge für CO₂-Märkte erörtert, ihre Rolle im globalen Klimaschutz kontextualisiert und abschließend spezifische Empfehlungen für Politik und Wirtschaft formuliert.

Implikationen für die Klimapolitik

Die Einführung und Weiterentwicklung von CO₂-Märkten hat tiefgreifende Implikationen für die Gestaltung der nationalen und internationalen Klimapolitik. Zunächst etablieren diese Märkte einen expliziten Preis für Kohlenstoffemissionen, der als starkes Anreizsignal für Unternehmen dient, ihre Emissionen zu reduzieren (Haïtes et al., 2018)(Isah et al., 2023). Indem sie die externen Kosten der Umweltverschmutzung internalisieren, fördern sie Investitionen in kohlenstoffarme Technologien und Prozesse (Setyawati & Wibawa, 2024). Die Erfahrung mit dem EU-Emissionshandelssystem (EU-EHS), dem weltweit größten und liquidesten Kohlenstoffmarkt, zeigt, dass ein gut funktionierendes System signifikante Emissionsreduktionen bewirken kann, insbesondere in Sektoren wie der Stromerzeugung (Klimko & Hasprová, 2025)(Egenhofer et al., 2011). Die Reduktionen im EU-EHS in den ersten Phasen waren jedoch nicht immer linear oder ausreichend, was auf anfängliche Überallokationen von Zertifikaten und eine daraus resultierende geringe Preissensibilität hinweist (Clò, 2011). Dies unterstreicht die Notwendigkeit einer dynamischen Anpassung der Gesamtzahl der verfügbaren Zertifikate, um die gewünschte Knappheit und damit ein wirksames Preissignal zu gewährleisten.

Darüber hinaus beeinflussen CO₂-Märkte die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen und können zu strukturellen Veränderungen in der Wirtschaft führen. Unternehmen, die in die Reduktion ihrer Emissionen investieren, können langfristig wettbewerbsfähiger werden, während emissionsintensive Industrien unter Druck geraten, sich anzupassen oder ihre Geschäftsmodelle zu transformieren (Olasehinde-Williams, 2024). Diese Transformation ist nicht ohne Herausforderungen. Insbesondere für energieintensive Industrien besteht das Risiko der “Carbon Leakage”, bei dem Unternehmen ihre Produktion in Länder mit weniger strengen Klimaschutzauflagen verlagern, was die globalen Emissionen nicht reduziert, sondern nur verlagert (Healy et al., 2018). Politische Maßnahmen wie der Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) der EU sind Versuche, diesem Risiko entgegenzuwirken und gleiche Wettbewerbsbedingungen zu schaffen, indem Importe aus Ländern ohne verglei-

ichbare CO₂-Preise bepreist werden (Yang et al., 2024). Solche Mechanismen sind jedoch komplex in der Umsetzung und können internationale Handelsbeziehungen belasten.

Die Einnahmen aus dem Verkauf von Emissionszertifikaten stellen eine weitere wichtige Implikation dar. Diese Einnahmen können von Regierungen für verschiedene Zwecke eingesetzt werden, darunter Investitionen in erneuerbare Energien, Klimaanpassungsmaßnahmen, Steuererleichterungen oder die Unterstützung von Haushalten mit geringem Einkommen, um die sozialen Auswirkungen der CO₂-Bepreisung abzufedern (Ohlendorf et al., 2020)(Batini et al., 2020). Die Art und Weise, wie diese Einnahmen verwendet werden, ist entscheidend für die öffentliche Akzeptanz und die Legitimität des Systems. Eine transparente und gerechte Verteilung kann dazu beitragen, Widerstände gegen die CO₂-Bepreisung zu minimieren und die breite Unterstützung für Klimaschutzmaßnahmen zu stärken. In Dänemark beispielsweise wurden Einnahmen aus der CO₂-Bepreisung genutzt, um Klimaschutzinitiativen zu finanzieren und gleichzeitig die Wettbewerbsfähigkeit der Industrie zu erhalten (Batini et al., 2020).

Schließlich integrieren CO₂-Märkte oft Elemente der Innovation und des Technologietransfers. Der Anreiz zur Emissionsreduktion fördert die Forschung und Entwicklung neuer, kohlenstoffarmer Technologien und die Anwendung bestehender Lösungen in neuen Kontexten (Anser et al., 2020). Dies gilt nicht nur für industrielle Prozesse, sondern auch für die Energieerzeugung und den Verkehrssektor (Falanga et al., 2025)(He & Peng, 2024). Die Einführung von EHS in Ländern wie China hat gezeigt, dass solche Systeme auch dazu beitragen können, die Datenqualität und die Überwachung von Emissionen zu verbessern, was wiederum die Grundlage für fundierte politische Entscheidungen stärkt (Wei et al., 2024). Die erfolgreiche Implementierung erfordert jedoch nicht nur ein starkes Preissignal, sondern auch unterstützende Rahmenbedingungen wie klare Regulierungen, Investitionssicherheit und den Abbau von Markthindernissen.

Grenzen und Herausforderungen des Emissionshandels

Trotz ihres Potenzials sind CO₂-Märkte mit erheblichen Grenzen und Herausforderungen konfrontiert, die ihre Wirksamkeit und Akzeptanz beeinträchtigen können. Eine der größten Herausforderungen ist die **Preisvolatilität** und die damit verbundene Unsicherheit für Unternehmen (Chen et al., 2025). Ein instabiler Kohlenstoffpreis erschwert langfristige Investitionsplanungen in Dekarbonisierungstechnologien. Wenn der Preis zu niedrig ist, bietet er keine ausreichenden Anreize zur Emissionsreduktion; ist er zu hoch oder zu volatil, kann er die Wirtschaft belasten und zu politischem Widerstand führen (Holt & Shobe, 2016). Der anfängliche Preisverfall im EU-EHS nach der Finanzkrise 2008 ist ein prägnantes Beispiel dafür, wie externe Schocks die Marktmechanismen stören und die Klimawirksamkeit untergraben können (Clò, 2011). Mechanismen wie die Marktstabilitätsreserve (MSR) im EU-EHS wurden eingeführt, um auf solche Ungleichgewichte zu reagieren und die Preisstabilität zu verbessern, indem sie das Angebot an Zertifikaten anpassen (Kim, 2021).

Eine weitere zentrale Herausforderung ist das bereits erwähnte **Carbon Leakage**. Obwohl Maßnahmen wie CBAM eingeführt werden, bleibt die Gefahr bestehen, dass strengere CO₂-Preise in einer Region zu einer Verlagerung der Produktion und damit der Emissionen in andere Regionen führen, ohne einen Netto-Klimanutzen zu erzielen (Healy et al., 2018)(Yang et al., 2024). Die Bewertung des tatsächlichen Ausmaßes von Carbon Leakage ist komplex und umstritten, da es schwierig ist, die kausalen Zusammenhänge eindeutig zu identifizieren (Healy et al., 2018). Die Sorge um die internationale Wettbewerbsfähigkeit ist jedoch ein starkes Argument für Industrieverbände gegen strengere Klimaschutzmaßnahmen.

Die **Zuteilung von Emissionszertifikaten** ist ebenfalls ein kritischer Punkt. Die anfängliche kostenlose Zuteilung von Zertifikaten, oft basierend auf historischen Emissionen, kann zu unerwarteten Gewinnen für Unternehmen führen ("Windfall Profits") und die Anreize zur Emissionsreduktion abschwächen (Weiqi et al., 2018). Obwohl viele Systeme, wie das EU-EHS, zunehmend auf Auktionen als primäres Zuteilungsverfahren umgestellt haben, bleibt die Frage der gerechten und effizienten Zuteilung, insbesondere für neue Marktteil-

nehmer oder in expandierenden Sektoren, eine fortwährende Herausforderung (Garcia-Torea et al., 2021). Die Wahl des Zuteilungsmechanismus hat weitreichende Auswirkungen auf die Kosten für Unternehmen, die Einnahmen für den Staat und die wahrgenommene Fairness des Systems.

Darüber hinaus stehen CO₂-Märkte vor der Herausforderung, **neue Sektoren** wie Landwirtschaft, Verkehr und Gebäude in effektiver Weise einzubeziehen (Spiegel et al., 2024)(Falanga et al., 2025). Diese Sektoren weisen oft eine hohe Anzahl kleiner Emittenten, heterogene Emissionsquellen und komplexe Überwachungs- und Berichterstattungsprozesse auf, was die Implementierung eines EHS erschwert. Für den Verkehrssektor beispielsweise sind die direkten Emissionen von Millionen von Fahrzeugen schwer zu verfolgen, was indirekte Bepreisungsmechanismen über Kraftstoffe oder über vorgelagerte Sektoren erforderlich macht (Falanga et al., 2025). Auch die Landwirtschaft, mit ihren biogenen Emissionen und komplexen Anreizstrukturen, stellt eine besondere Herausforderung dar (Spiegel et al., 2024).

Schließlich können **politische Unsicherheiten** und mangelnde langfristige Verpflichtungen die Wirksamkeit von CO₂-Märkten untergraben (Chen et al., 2025). Häufige Änderungen der Regeln, unklare zukünftige Emissionsziele oder mangelnde Durchsetzung können das Vertrauen der Investoren untergraben und die Fähigkeit der Märkte, langfristige Signale zu senden, beeinträchtigen. Dies ist besonders relevant in dynamischen politischen Landschaften, wo Klimapolitik oft Gegenstand intensiver Debatten ist (Dütschke et al., 2025). Die Akzeptanz in der Bevölkerung hängt auch stark von der wahrgenommenen Gerechtigkeit und der Transparenz des Systems ab (Ohlendorf et al., 2020).

Verbesserungsvorschläge für CO₂-Märkte

Um die Wirksamkeit und Akzeptanz von CO₂-Märkten zu erhöhen, sind eine Reihe von Verbesserungen und Anpassungen notwendig. Ein zentraler Ansatzpunkt ist die **Stärkung der Preissignale und die Reduzierung der Preisvolatilität**. Dies

kann durch die Einführung von Preiskorridoren geschehen, die Mindest- und Höchstpreise für Zertifikate festlegen (Holt & Shobe, 2016). Ein Mindestpreis würde sicherstellen, dass Investitionen in Dekarbonisierung auch in Zeiten geringer Nachfrage attraktiv bleiben, während ein Höchstpreis eine übermäßige Belastung der Wirtschaft in Phasen hoher Nachfrage verhindert und somit die politische Akzeptanz erhöht. Die Marktstabilitätsreserve im EU-EHS ist ein Schritt in diese Richtung, könnte aber durch explizitere Preisbandbreiten ergänzt werden (Kim, 2021).

Eine weitere wichtige Maßnahme ist die **Harmonisierung und Verknüpfung von Emissionshandelssystemen** auf regionaler und internationaler Ebene. Die Verknüpfung verschiedener Systeme kann die Marktliquidität erhöhen, die Preisstabilität verbessern und die Effizienz der Emissionsreduktion steigern, indem sie den Handel über größere geografische Räume hinweg ermöglicht (Black, 2018). Dies erfordert jedoch eine sorgfältige Abstimmung der Systemdesigns, einschließlich der Obergrenzen, Zuteilungsregeln und Überwachungsprotokolle, um Arbitrage-Möglichkeiten zu vermeiden und die Integrität der Systeme zu wahren (Cheong, 2025). Das Pariser Abkommen bietet mit Artikel 6 einen Rahmen für die internationale Zusammenarbeit und die Verknüpfung von CO₂-Märkten, dessen Umsetzung jedoch noch in den Kinderschuhen steckt (Black, 2018).

Die **Anpassung der Zuteilungsregeln** ist ebenfalls entscheidend. Eine vollständige Umstellung auf die Versteigerung von Zertifikaten würde nicht nur die Staatseinnahmen maximieren, sondern auch gleiche Wettbewerbsbedingungen schaffen und die Anreize zur Emissionsreduktion verstärken, da Unternehmen die vollen Kosten ihrer Emissionen tragen müssen (Weiqi et al., 2018). Übergangsregelungen und gezielte Unterstützung für besonders exponierte Sektoren könnten das Risiko des Carbon Leakage mindern, ohne die Grundprinzipien des Systems zu untergraben (Healy et al., 2018). Die Einnahmen aus der Versteigerung könnten gezielt zur Förderung von Innovationen, zum Ausgleich sozialer Härten oder zur Finanzierung von Klimaanpassungsmaßnahmen eingesetzt werden, was die Akzeptanz des Systems in der Bevölkerung und der Industrie erhöhen würde (Ohlendorf et al., 2020).

Um die Ausweitung auf **neue Sektoren** zu erleichtern, könnten maßgeschneiderte Ansätze entwickelt werden. Für den Gebäudesektor und den Verkehr könnte ein separates EHS oder eine Erweiterung des bestehenden Systems auf vorgelagerte Brennstofflieferanten in Betracht gezogen werden, um die Komplexität der direkten Erfassung vieler kleiner Emittenten zu umgehen (Falanga et al., 2025). Für die Landwirtschaft könnten Anreize für kohlenstoffbindende Praktiken oder die Reduzierung von Methanemissionen durch ein Kredit- oder Offset-System geschaffen werden, das eng mit dem Haupt-EHS verknüpft ist (Spiegel et al., 2024)(Salzman & Weisbach, 2024). Die Überwachung, Berichterstattung und Verifizierung (MRV) ist in diesen Sektoren jedoch besonders anspruchsvoll und erfordert innovative Lösungen (Herman, 2024).

Schließlich ist die **Förderung von Transparenz und Governance** unerlässlich. Klare Regeln, eine unabhängige Aufsicht und eine regelmäßige Überprüfung der Systemleistung sind entscheidend, um das Vertrauen der Marktteilnehmer und der Öffentlichkeit zu gewinnen und zu erhalten (Herman, 2024). Die Einbeziehung von Stakeholdern in den Gestaltungsprozess kann dazu beitragen, praktikable und akzeptable Lösungen zu entwickeln und potenzielle Widerstände frühzeitig zu identifizieren und anzugehen. Eine vorausschauende Kommunikation über die Ziele und erwarteten Auswirkungen des Systems ist ebenfalls von großer Bedeutung.

Rolle im globalen Klimaschutz

Die Rolle von CO₂-Märkten im globalen Klimaschutz ist von entscheidender Bedeutung, da sie ein flexibles und kosteneffizientes Instrument zur Erreichung von Emissionsreduktionszielen darstellen. Mit der Etablierung des EU-EHS als Vorreiter und der Einführung ähnlicher Systeme in anderen Jurisdiktionen wie China, Kalifornien und Südkorea hat sich der Kohlenstoffmarkt zu einem globalen Phänomen entwickelt (Hu et al., 2022). Diese Systeme tragen dazu bei, die national festgelegten Beiträge (NDCs) unter dem Pariser Abkom-

men zu erreichen, indem sie einen marktbasierten Mechanismus zur Emissionsminderung bereitstellen (Digitemie & Ekemezie, 2024).

Ein wesentlicher Vorteil von CO₂-Märkten ist ihre Fähigkeit, Emissionsreduktionen dort zu fördern, wo sie am kostengünstigsten sind. Dies ist besonders relevant in einem globalen Kontext, in dem die Grenzkosten der Emissionsreduktion zwischen Ländern und Sektoren erheblich variieren können (Timilsina, 2018). Der internationale Handel mit Emissionszertifikaten oder Gutschriften, wie er unter Artikel 6 des Pariser Abkommens vorgesehen ist, hat das Potenzial, die globalen Kosten des Klimaschutzes zu senken und die Ambitionen der Länder zu erhöhen (Black, 2018). Durch die Schaffung eines gemeinsamen Preissignals können internationale CO₂-Märkte Anreize für Investitionen in kohlenstoffarme Technologien in Entwicklungsländern schaffen und so einen Technologietransfer fördern (Anser et al., 2020).

Allerdings ist die Skalierung von CO₂-Märkten auf globaler Ebene mit erheblichen Herausforderungen verbunden. Dazu gehören die **Heterogenität der nationalen Rahmenbedingungen**, unterschiedliche Ambitionsniveaus der Klimaziele und die Komplexität der Governance und Überwachung (Cheong, 2025). Die Entwicklung eines robusten und vertrauenswürdigen internationalen Kohlenstoffmarktes erfordert einheitliche Regeln für die Anrechnung von Emissionsreduktionen, die Vermeidung von Doppelzählungen und die Sicherstellung der “Zusätzlichkeit” von Projekten (Salzman & Weisbach, 2024). Die Erfahrungen mit den Mechanismen des Kyoto-Protokolls, wie dem Clean Development Mechanism (CDM), haben gezeigt, dass solche Systeme anfällig für Kritik hinsichtlich ihrer Umweltintegrität und der tatsächlichen Wirksamkeit sein können (Waldegren, 2012).

Trotz dieser Herausforderungen bleibt die Rolle von CO₂-Märkten im globalen Klimaschutz unverzichtbar. Sie bieten einen flexiblen Rahmen, der es Ländern ermöglicht, ihre individuellen Reduktionspfade zu wählen, während sie gleichzeitig zu einem kollektiven globalen Ziel beitragen. Die zunehmende Vernetzung und Harmonisierung regionaler und nationaler EHS könnte letztlich zu einem kohärenten globalen Kohlenstoffpreis führen, der die

Dekarbonisierung weltweit vorantreibt (Black, 2018). Dies würde auch die Verhandlungen über zukünftige Klimaziele erleichtern, da ein gemeinsames Preissignal eine effizientere Allokation von Ressourcen ermöglicht. Die Stärkung der Kapazitäten in Entwicklungsländern für die Implementierung und den Betrieb von CO₂-Märkten ist dabei ein entscheidender Faktor (Digitemie & Ekemezie, 2024).

Empfehlungen für Politik und Wirtschaft

Aus den gewonnenen Erkenntnissen lassen sich konkrete Empfehlungen für Politik und Wirtschaft ableiten, um die Wirksamkeit und Akzeptanz von CO₂-Märkten zu maximieren und ihren Beitrag zum Klimaschutz zu stärken.

Für die Politik:

1. **Stärkung des Preissignals und der Marktstabilität:** Regierungen sollten Mechanismen zur Stabilisierung des Kohlenstoffpreises in Betracht ziehen, wie z.B. Preiskorridore (Mindest- und Höchstpreise) oder eine dynamischere Anpassung der Zertifikatsmenge (z.B. durch eine weiterentwickelte Marktstabilitätsreserve) (Holt & Shobe, 2016). Ein robustes und vorhersehbares Preissignal ist entscheidend für langfristige Investitionsentscheidungen in kohlenstoffarme Technologien (Kim, 2021).
2. **Transparente und gerechte Einnahmenverwendung:** Die Einnahmen aus der Versteigerung von Emissionszertifikaten sollten transparent verwaltet und gezielt eingesetzt werden, um die soziale Akzeptanz zu erhöhen (Ohlendorf et al., 2020). Dies kann durch die Förderung von Innovationen, die Unterstützung von Haushalten mit geringem Einkommen (z.B. durch Pro-Kopf-Rückzahlungen oder gezielte Subventionen für Energieeffizienz) oder Investitionen in Infrastruktur für erneuerbare Energien geschehen (Batini et al., 2020). Die Verteilungsgerechtigkeit ist ein Schlüsselfaktor für die Legitimität des Systems.
3. **Umfassende Integration von Sektoren:** Es sollte eine schrittweise, aber konsequente Integration weiterer Sektoren wie Verkehr, Gebäude und Landwirtschaft in

die CO₂-Bepreisung angestrebt werden (Spiegel et al., 2024)(Falanga et al., 2025). Dabei sind sektorspezifische Besonderheiten zu berücksichtigen und gegebenenfalls maßgeschneiderte Ansätze zu entwickeln, um eine effiziente und praktikable Umsetzung zu gewährleisten.

4. **Internationale Kooperation und Harmonisierung:** Die aktive Förderung der internationalen Zusammenarbeit und die Verknüpfung von Emissionshandelssystemen ist entscheidend, um die globalen Emissionsreduktionsziele kosteneffizient zu erreichen (Black, 2018). Dies beinhaltet die Entwicklung gemeinsamer Standards und die Nutzung der Möglichkeiten von Artikel 6 des Pariser Abkommens, um einen effektiven internationalen Kohlenstoffmarkt aufzubauen.
5. **Langfristige politische Verlässlichkeit:** Eine klare und konsistente langfristige Klimapolitik ist unerlässlich, um Investitionssicherheit zu gewährleisten und das Vertrauen der Wirtschaft in die CO₂-Märkte zu stärken (Chen et al., 2025). Häufige Änderungen der Regeln oder unklare Ziele untergraben die Wirksamkeit des Instruments.

Für die Wirtschaft:

1. **Strategische Dekarbonisierungsplanung:** Unternehmen sollten die CO₂-Bepreisung als festen Bestandteil ihrer Geschäftsstrategie betrachten und proaktiv in die Dekarbonisierung ihrer Prozesse und Produkte investieren (Setyawati & Wibawa, 2024). Dies beinhaltet die Identifizierung von Reduktionspotenzialen, die Implementierung energieeffizienter Technologien und die Umstellung auf erneuerbare Energien (White, 2023).
2. **Innovation und Forschung & Entwicklung:** Die Wirtschaft sollte die Anreize der CO₂-Märkte nutzen, um in Forschung und Entwicklung neuer kohlenstoffarmer Technologien zu investieren (Anser et al., 2020). Dies kann Wettbewerbsvorteile schaffen und zur Entwicklung von Lösungen beitragen, die über die eigenen Emissionen hinausgehen.

3. **Risikomanagement und Anpassung:** Unternehmen müssen die Preisvolatilität und regulatorische Unsicherheiten von CO₂-Märkten in ihren Risikomanagementstrategien berücksichtigen. Dies kann die Absicherung gegen Preisschwankungen oder die Diversifizierung von Energiequellen umfassen (Rao et al., 2023).
4. **Transparenz und Berichterstattung:** Eine transparente Berichterstattung über Emissionen und Reduktionsmaßnahmen ist nicht nur regulatorisch erforderlich, sondern kann auch das Vertrauen von Investoren und Kunden stärken. Die Nutzung von Daten zur kontinuierlichen Verbesserung der Emissionsleistung ist entscheidend (Herman, 2024).
5. **Engagement im politischen Prozess:** Unternehmen sollten sich konstruktiv in den politischen Dialog über die Weiterentwicklung von CO₂-Märkten einbringen, um praktikable und effektive Lösungen zu fördern, die sowohl Klimaschutzziele als auch wirtschaftliche Realitäten berücksichtigen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass CO₂-Märkte ein unverzichtbares Instrument im Kampf gegen den Klimawandel sind, dessen Potenzial bei konsequenter Weiterentwicklung und Anpassung an die jeweiligen Kontextbedingungen voll ausgeschöpft werden kann. Die fortwährende Evaluation, die Integration von Lernerfahrungen aus bestehenden Systemen und eine enge Zusammenarbeit zwischen Politik, Wirtschaft und Wissenschaft sind entscheidend für ihren langfristigen Erfolg (Döbbeling-Hildebrandt et al., 2024). Die Herausforderungen sind beträchtlich, aber die Chancen, durch marktwirtschaftliche Anreize eine nachhaltige und kohlenstoffarme Wirtschaft zu gestalten, sind noch größer.

Einschränkungen

Während diese Forschung signifikante Beiträge zum Verständnis des CO₂-Zertifikatehandels leistet und dessen Rolle im Klimaschutz beleuchtet, ist es wichtig, mehrere Einschränkungen anzuerkennen, die die Ergebnisse kontextualisieren und Bereiche für zukünftige Verfeinerungen aufzeigen. Diese Grenzen sind typisch für empirische Analysen

komplexer Politikfelder und betreffen methodische Ansätze, den Umfang der betrachteten Systeme sowie die zugrunde liegenden theoretischen Annahmen.

Methodische Einschränkungen

Die methodische Herangehensweise dieser Arbeit, die auf einer Literaturanalyse und dem Vergleich von Fallstudien basiert, unterliegt inhärenten Grenzen bei der kausalen Zuschreibung. Es ist oft schwierig, die beobachteten Emissionsreduktionen kausal eindeutig den CO₂-Preissystemen zuzuordnen und sie von anderen gleichzeitig wirkenden Faktoren zu isolieren. Dazu gehören: - **Endogenität und Kausalität:** Die Einführung von CO₂-Preissystemen ist selten ein exogenes Ereignis. Politische Entscheidungen, makroökonomische Entwicklungen oder technologische Fortschritte können sowohl die Emissionen als auch die Gestaltung und Wirksamkeit der CO₂-Märkte beeinflussen. Dies erschwert die Bestimmung der reinen kausalen Wirkung. Obwohl ökonometrische Methoden wie die Differenz-in-Differenzen-Analyse darauf abzielen, diesen Effekt zu isolieren, bleiben Restunsicherheiten bestehen. - **Datenverfügbarkeit und -qualität:** Trotz der Bemühungen um hochwertige Daten können Lücken in den Zeitreihen, unterschiedliche Messmethoden oder Aggregationsniveaus zwischen den Fallstudien die Genauigkeit und Vergleichbarkeit beeinträchtigen. Insbesondere für neuere oder weniger etablierte Systeme kann die Datenbasis noch nicht ausreichend sein, um robuste Langzeitanalysen durchzuführen. - **Modellannahmen:** Die verwendeten ökonometrischen Modelle beruhen auf bestimmten Annahmen (z.B. parallele Trends in DiD-Analysen), deren vollständige Erfüllung in der Realität nicht immer gegeben ist. Verletzungen dieser Annahmen können zu verzerrten Schätzungen führen.

Umfang und Generalisierbarkeit

Die vorliegende Arbeit konzentrierte sich auf ausgewählte, etablierte Emissionshandelssysteme (EU ETS, California ETS, chinesisches ETS). Dies führte zu einer tiefgehenden

Analyse, schränkt jedoch die Generalisierbarkeit der Ergebnisse ein: - **Spezifische Kontexte:** Jedes untersuchte System agiert in einem einzigartigen politischen, ökonomischen und institutionellen Kontext. Die Übertragbarkeit von “Best Practices” oder die Bewertung der Wirksamkeit auf andere Regionen oder Sektoren muss daher mit Vorsicht erfolgen. Beispielsweise sind die Erfahrungen des EU ETS in einer hochentwickelten multi-nationalen Wirtschaft nicht direkt auf ein aufstrebendes Land mit einer dominierenden Staatsindustrie übertragbar. - **Sektorale Abdeckung:** Obwohl die untersuchten Systeme eine breite sektorale Abdeckung aufweisen, wurden nicht alle Emissionsquellen (z.B. Landwirtschaft in vollem Umfang) oder alle Gase einbezogen. Die Analyse konzentrierte sich primär auf CO₂-Emissionen, während andere Treibhausgase (Methan, Lachgas) ebenfalls eine wichtige Rolle spielen. - **Fokus auf Emissionshandel:** Die Arbeit konzentrierte sich auf den Emissionshandel als primäres Instrument. Obwohl der Vergleich mit anderen Instrumenten erfolgte, wurden die Synergien und Konflikte in einem umfassenden Politikmix nicht detailliert quantifiziert.

Zeitliche und Kontextuelle Beschränkungen

Die Dynamik des Klimawandels und der Klimapolitik stellt inhärente zeitliche und kontextuelle Beschränkungen dar: - **Langfristige Effekte:** Klimaschutzmaßnahmen, insbesondere solche, die auf Investitionen in Infrastruktur und Technologiewandel abzielen, entfalten ihre volle Wirkung oft erst über Jahrzehnte. Die Analyse basiert auf verfügbaren historischen Daten, die möglicherweise noch nicht das vollständige langfristige Potenzial oder die Auswirkungen der jüngsten Reformen (z.B. EU ETS Phase 4, CBAM) vollständig widerspiegeln. - **Sich schnell änderndes Feld:** Die Klimapolitik ist ein sich schnell entwickelndes Feld mit kontinuierlichen politischen Anpassungen, technologischen Durchbrüchen und neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen. Die Schlussfolgerungen dieser Arbeit spiegeln den Kenntnisstand zum Zeitpunkt der Erstellung wider und können durch zukünftige Entwicklungen beeinflusst werden. - **Externe Schocks:** Externe Ereignisse wie globale Wirtschaft-

skrisen, geopolitische Konflikte oder Pandemien können die Emissionsentwicklung und die Funktionsweise von CO₂-Märkten erheblich beeinflussen. Die Kontrolle dieser Faktoren in der Analyse ist herausfordernd und kann nie vollständig sein.

Theoretische und Konzeptionelle Einschränkungen

Die der Arbeit zugrunde liegenden theoretischen Modelle weisen ebenfalls Grenzen auf: - **Rationalitätsannahmen:** Umweltökonomische Modelle gehen oft von rational handelnden Akteuren aus, die auf Preissignale optimal reagieren. In der Realität können jedoch Verhaltensökonomische Faktoren, Informationsasymmetrien, institutionelle Trägheit oder politische Widerstände die Reaktion auf CO₂-Preise beeinflussen. - **Messung externer Kosten:** Die genaue Quantifizierung der externen Kosten von CO₂-Emissionen (der “Social Cost of Carbon”) ist weiterhin Gegenstand wissenschaftlicher Debatten und Unsicherheiten. Dies beeinflusst die theoretische “optimale” Höhe eines CO₂-Preises. - **Gerechte Verteilung der Lasten:** Die theoretische Effizienz von CO₂-Märkten adressiert nicht automatisch Fragen der Verteilungsgerechtigkeit. Die Untersuchung der sozialen Auswirkungen und die Entwicklung von Kompensationsmechanismen erfordert zusätzliche Analysen, die über den Fokus dieser Arbeit hinausgehen.

Trotz dieser Einschränkungen liefert die Forschung wertvolle Einblicke in die Klimaschutzwirkung von CO₂-Preissystemen, und die identifizierten Grenzen bieten klare Richtungen für zukünftige Untersuchungen. Die Ergebnisse tragen dazu bei, ein nuanciertes Verständnis der Potenziale und Herausforderungen dieser entscheidenden Klimaschutzinstrumente zu entwickeln.

Zukünftige Forschungsrichtungen

Diese Forschung öffnet mehrere vielversprechende Wege für zukünftige Untersuchungen, die aktuelle Einschränkungen adressieren und die theoretischen und praktischen Beiträge dieser Arbeit erweitern könnten. Angesichts der Dringlichkeit des Klimawandels

und der sich ständig weiterentwickelnden Klimapolitik ist eine kontinuierliche und vertiefte Forschung zu CO₂-Preissystemen unerlässlich.

1. Empirische Validierung und groß angelegte Tests von Reformen

Zukünftige Forschung sollte sich auf die detaillierte empirische Evaluierung der jüngsten Reformen in etablierten Emissionshandelssystemen konzentrieren, insbesondere der Phase 4 des EU ETS, der Einführung des CBAM und der Weiterentwicklung des chinesischen ETS. Dies umfasst: - **Auswirkungen des CBAM:** Eine umfassende Analyse der tatsächlichen Auswirkungen des Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) auf Carbon Leakage, Wettbewerbsfähigkeit, Handelspartner und globale Emissionsreduktionen. Dies erfordert die Sammlung und Analyse von Handelsdaten, Produktionsverlagerungen und Emissionsentwicklungen in den betroffenen Sektoren und Ländern. - **Wirksamkeit der MSR unter extremen Bedingungen:** Eine detaillierte Untersuchung der Funktionsweise und Wirksamkeit der Marktstabilitätsreserve (MSR) im EU ETS unter verschiedenen Marktschocks (z.B. weitere Wirtschaftskrisen, drastische Energiepreisänderungen), um ihre Robustheit und Anpassungsfähigkeit zu bewerten. - **Langfristige Effekte des erweiterten ETS:** Analyse der Auswirkungen der Ausweitung des EU ETS auf den Seeverkehr sowie der Einführung des ETS₂ für Gebäude und Straßenverkehr auf Emissionsreduktionen, Kosten für Verbraucher und technologische Innovationen in diesen Sektoren.

2. Sektorale Integration und maßgeschneiderte Ansätze

Die Integration neuer Sektoren in CO₂-Preissysteme stellt eine erhebliche Herausforderung dar. Zukünftige Forschung sollte sich darauf konzentrieren, maßgeschneiderte Lösungen für schwer zu dekarbonisierende Sektoren zu entwickeln: - **Landwirtschaftliche Emissionen:** Untersuchung innovativer Ansätze zur Bepreisung oder Anreizsetzung für die Reduzierung biogener Emissionen (Methan, Lachgas) und zur Förderung kohlenstoffbindender Praktiken in der Landwirtschaft, einschließlich der Entwicklung robuster MRV-Systeme.

- **Kleine Emittenten und Haushalte:** Erforschung effektiver Mechanismen zur CO₂-Bepreisung in Sektoren mit vielen kleinen Emittenten (z.B. Kleinunternehmen, Haushalte im Wärmebereich), die administrative Komplexität minimieren und soziale Akzeptanz maximieren. Dies könnte die Rolle von vorgelagerten Bepreisungsansätzen oder die Integration in bestehende Steuersysteme umfassen.

3. Interaktion von CO₂-Bepreisung und Komplementärmaßnahmen

Die synergetische Wirkung von CO₂-Preisen mit anderen Klimaschutzmaßnahmen ist entscheidend. Zukünftige Studien sollten die optimale Gestaltung dieses Politikmixes untersuchen: - **Politikmix-Optimierung:** Quantifizierung der Synergien und potenziellen Konflikte zwischen CO₂-Preisen, Subventionen (z.B. für erneuerbare Energien), Regulierungen (z.B. Effizienzstandards) und Infrastrukturinvestitionen, um den kosteneffizientesten und sozial gerechtesten Weg zur Dekarbonisierung zu finden. - **Rolle von Technologiepolitik:** Eine vertiefte Analyse, wie CO₂-Preise die Innovationspfade beeinflussen und welche zusätzlichen Technologiepolitiken (z.B. F&E-Förderung, Industriepolitik) erforderlich sind, um bahnbrechende kohlenstoffarme Technologien zur Marktreife zu bringen und zu skalieren.

4. Verteilungswirkungen und soziale Gerechtigkeit

Die sozialen Auswirkungen der CO₂-Bepreisung sind ein zentrales Thema für die Akzeptanz. Zukünftige Forschung sollte sich auf die Verfeinerung von Kompensationsmechanismen konzentrieren: - **Progressive Einnahmenverwendung:** Entwicklung und Evaluation von Modellen für die Einnahmenverwendung (z.B. Pro-Kopf-Rückzahlungen, gezielte Unterstützung), die die regressiven Effekte der CO₂-Bepreisung vollständig ausgleichen und möglicherweise sogar progressive Verteilungswirkungen erzielen. - **Regionale und sektorale Gerechtigkeit:** Untersuchung der spezifischen Verteilungswirkungen von CO₂-Preisen in strukturschwachen Regionen oder in Sektoren, die besonders vom Übergang

betroffen sind, und Entwicklung von Strategien zur gerechten Lastenverteilung und zur Unterstützung eines fairen Übergangs.

5. Internationale Koordination und globale Kohlenstoffmärkte

Die Entwicklung eines effektiven globalen Kohlenstoffpreises erfordert eine stärkere internationale Zusammenarbeit: - **Artikel 6 des Pariser Abkommens:** Detaillierte Analyse der Implementierung und Wirksamkeit der Mechanismen von Artikel 6 (insbesondere Art. 6.2 und 6.4) zur Förderung internationaler Kohlenstoffmärkte und zur Vermeidung von Doppelzählungen. - **Verknüpfung von ETS:** Untersuchung der Herausforderungen und Vorteile einer stärkeren Verknüpfung regionaler und nationaler Emissionshandelssysteme, einschließlich der Harmonisierung von Standards und der Governance-Strukturen, um die Effizienz zu steigern und Carbon Leakage zu reduzieren.

6. Politische Ökonomie und Governance

Die politische Umsetzbarkeit und Robustheit von CO₂-Märkten sind entscheidend für ihren Erfolg: - **Politische Akzeptanzfaktoren:** Vertiefte Forschung zu den Faktoren, die die politische und öffentliche Akzeptanz von CO₂-Preissystemen beeinflussen, einschließlich der Rolle von Kommunikation, Stakeholder-Einbindung und dem Design von Kompensationsmechanismen. - **Governance-Modelle:** Vergleich und Bewertung verschiedener Governance-Modelle für CO₂-Märkte (z.B. unabhängige Behörden, politische Kontrolle) im Hinblick auf ihre Fähigkeit, Stabilität, Transparenz und Integrität zu gewährleisten und gleichzeitig auf dynamische Entwicklungen zu reagieren.

7. Digitale Technologien und MRV-Systeme

Die Digitalisierung bietet neue Möglichkeiten zur Verbesserung der Effizienz und Integrität von CO₂-Märkten: - **Blockchain und intelligente Verträge:** Erforschung des Potenzials von Blockchain-Technologien und intelligenten Verträgen zur Verbesserung

der Transparenz, Rückverfolgbarkeit und Effizienz von MRV-Systemen und des Handels mit Emissionszertifikaten. - **KI und Datenanalyse:** Einsatz von künstlicher Intelligenz und fortgeschrittenen Datenanalysemethoden zur Verbesserung von Emissionsprognosen, zur Identifizierung von Marktmanipulationen und zur Optimierung der Steuerung von Marktstabilisierungsmechanismen.

Diese Forschungsrichtungen kollektiv weisen auf ein reicheres, nuancierteres Verständnis des CO₂-Zertifikatehandels und seiner Implikationen für Theorie, Praxis und Politik hin und sind entscheidend, um die globale Herausforderung des Klimawandels erfolgreich zu meistern.

Fazit

Die vorliegende Masterarbeit widmete sich der umfassenden Analyse der Klimaschutzwirkung des Emissionshandels als zentrales Instrument der Klimapolitik. Angesichts der Dringlichkeit der globalen Erwärmung und der Notwendigkeit effektiver Strategien zur Reduktion von Treibhausgasemissionen ist das Verständnis der Funktionsweise, der Potenziale und der Grenzen von marktbasierten Instrumenten wie dem Emissionshandel von entscheidender Bedeutung. Ziel dieser Arbeit war es, auf Basis einer systematischen Literaturanalyse und der Untersuchung relevanter Fallstudien ein differenziertes Bild der Effektivität des Emissionshandels zu zeichnen und dessen Beitrag zur Erreichung von Klimazielen zu bewerten. Die Ergebnisse der Untersuchung bestätigen die Rolle des Emissionshandels als potenziell wirksames Instrument, unterstreichen jedoch gleichzeitig die Komplexität seiner Implementierung und die Notwendigkeit einer sorgfältigen politischen Gestaltung, um seine volle Wirkung zu entfalten (Digitemie & Ekemezie, 2024)(Timilsina, 2018).

Die Untersuchung der Haupteergebnisse zur Klimaschutzwirkung des Emissionshandels zeigt, dass diese Mechanismen prinzipiell in der Lage sind, Emissionen zu reduzieren und

Anreize für Dekarbonisierung zu schaffen. Eine Meta-Analyse von Ex-post-Evaluierungen legt nahe, dass Kohlenstoffpreise, einschließlich Emissionshandelssysteme, in der Tat zu einer Reduzierung der Treibhausgasemissionen führen können (Döbbeling-Hildebrandt et al., 2024). Insbesondere das Europäische Emissionshandelssystem (EU ETS) wird häufig als ein Vorreiter und Referenzmodell in der Klimapolitik betrachtet und hat nachweislich zu Emissionsminderungen in den erfassten Sektoren beigetragen (Klimko & Hasprová, 2025)(Egenhofer et al., 2011)(Clò, 2011). Durch die Festlegung einer Obergrenze für Emissionen und die Schaffung eines Marktes für Emissionszertifikate wird ein Preis für Kohlenstoffemissionen etabliert, der Unternehmen dazu motiviert, ihre Emissionen zu senken, um Kosten zu sparen (Setyawati & Wibawa, 2024). Dieser Anreizmechanismus fördert nicht nur kurzfristige Effizienzsteigerungen, sondern stimuliert auch langfristig Investitionen in kohlenstoffarme Technologien und Prozesse (Anser et al., 2020). Die Wirksamkeit hängt jedoch stark von der Ausgestaltung des Systems ab, insbesondere von der Höhe des Kohlenstoffpreises, der Knappheit der Zertifikate und der Stabilität des politischen Rahmens (Kim, 2021). Ein zu niedriger Preis oder eine Überallokation von Zertifikaten kann die Klimaschutzwirkung erheblich untergraben, wie in früheren Phasen des EU ETS beobachtet wurde (Clò, 2011).

Darüber hinaus haben die Analysen gezeigt, dass die Klimaschutzwirkung des Emissionshandels nicht isoliert betrachtet werden kann, sondern von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst wird. Dazu gehören makroökonomische Bedingungen, technologische Entwicklungen und die Wechselwirkung mit anderen klimapolitischen Instrumenten (Olasehinde-Williams, 2024). Die Fähigkeit von Emissionshandelssystemen, technologische Innovationen zu fördern und somit langfristige Dekarbonisierungspfade zu eröffnen, ist ein wesentlicher Aspekt ihrer Klimaschutzwirkung (Anser et al., 2020). Unternehmen, die mit einem stabilen und ausreichend hohen Kohlenstoffpreis konfrontiert sind, haben einen klaren Anreiz, in Forschung und Entwicklung emissionsärmerer Alternativen zu investieren. Dies ist besonders relevant für Sektoren, die schwer zu dekarbonisieren sind, und in denen innovative Lösungen entscheidend sind, um die Klimaziele zu erreichen. Jedoch können auch Herausforderungen

wie die Kohlenstoffleckage, bei der Unternehmen ihre Produktion in Länder mit weniger strengen Emissionsvorschriften verlagern, die globale Wirksamkeit mindern (Healy et al., 2018). Um diesen Effekten entgegenzuwirken, sind Mechanismen wie der Kohlenstoffgrenzausgleichsmechanismus (CBAM) oder eine internationale Koordination der Klimapolitik vonnöten (Lysunets, 2023)(Yang et al., 2024).

Der Beitrag dieser Arbeit zum Verständnis des Emissionshandels liegt in der systematischen Aufarbeitung der vielfältigen Aspekte, die seine Klimaschutzwirkung beeinflussen, sowie in der Identifizierung kritischer Designelemente und zukünftiger Herausforderungen. Die Arbeit beleuchtet, wie eine effektive Allokation von Emissionsrechten, die Stabilität des Kohlenstoffpreises und eine robuste Governance entscheidend für den Erfolg eines Emissionshandelssystems sind (Weiqi et al., 2018)(Kim, 2021). Darüber hinaus wurde die Bedeutung der politischen Konsistenz und der Einbettung des Emissionshandels in ein breiteres Portfolio an Klimaschutzmaßnahmen hervorgehoben (Batini et al., 2020). Die Analyse der Literatur verdeutlicht, dass der Emissionshandel kein Allheilmittel ist, sondern ein leistungsfähiges Instrument, dessen Potenzial nur unter bestimmten Voraussetzungen voll ausgeschöpft werden kann. Insbesondere die Diskussion um die Verteilungswirkungen des Kohlenstoffpreises und die Notwendigkeit, soziale Gerechtigkeit bei der Ausgestaltung zu berücksichtigen, ist ein wichtiger Beitrag (Ohlendorf et al., 2020). Dies schließt die Berücksichtigung von Haushalten mit niedrigem Einkommen und die Unterstützung von Übergangsprozessen in betroffenen Industrien ein, um Akzeptanz und Legitimität des Instruments zu gewährleisten.

Ein weiterer wesentlicher Beitrag dieser Arbeit ist die Synthese von Erkenntnissen aus verschiedenen Emissionshandelssystemen weltweit, welche die universellen Prinzipien, aber auch die spezifischen Anpassungen an regionale Kontexte aufzeigt (Haïtes et al., 2018)(Black, 2018). Durch den Vergleich von Erfahrungen aus dem EU ETS mit Systemen in anderen Regionen, wie beispielsweise China (Wei et al., 2024)(Chen et al., 2025), konnten Gemeinsamkeiten in den Herausforderungen (z.B. Preisvolatilität (Chen et al., 2025)) und Erfolgsfaktoren (z.B. politische Entschlossenheit) identifiziert werden. Diese vergleichende Perspektive

ist entscheidend, um Best Practices zu erkennen und Lehren für die Entwicklung neuer oder die Weiterentwicklung bestehender Systeme zu ziehen. Die Arbeit betont, dass die Gestaltung von Emissionshandelssystemen ein dynamischer Prozess ist, der eine kontinuierliche Anpassung an neue wissenschaftliche Erkenntnisse, technologische Fortschritte und politische Rahmenbedingungen erfordert. Die Erkenntnisse dieser Masterarbeit dienen somit als wertvolle Grundlage für politische Entscheidungsträger und Wissenschaftler, die sich mit der Weiterentwicklung und Optimierung von Emissionshandelssystemen beschäftigen.

Trotz der umfassenden Analyse ergeben sich aus der vorliegenden Arbeit verschiedene vielversprechende Richtungen für zukünftige Forschung. Eine zentrale Forschungsfrage betrifft die optimale Integration von Emissionshandelssystemen mit anderen klimapolitischen Instrumenten. Obwohl die Notwendigkeit eines Politikmixes weithin anerkannt ist (Dütschke et al., 2025), bedarf es weiterer Forschung, um die Synergien und potenziellen Konflikte zwischen Instrumenten wie Kohlenstoffsteuern, Subventionen für erneuerbare Energien und regulatorischen Standards detaillierter zu untersuchen. Insbesondere die Frage, wie ein solcher Mix ausgestaltet sein muss, um sowohl Effektivität als auch soziale Akzeptanz zu maximieren, bleibt offen (Ohlendorf et al., 2020). Hierbei könnte eine vertiefte Analyse der Verteilungswirkungen verschiedener Politikmixe wertvolle Erkenntnisse liefern. Weiterhin ist die Untersuchung der Rolle von Emissionshandelssystemen in Schwellen- und Entwicklungsländern von großer Bedeutung. Während sich ein Großteil der Forschung auf etablierte Systeme wie das EU ETS konzentriert, bieten aufkommende Systeme in Asien oder Afrika einzigartige Kontexte und Herausforderungen, die spezifische Forschungsansätze erfordern (Thomas, 2008)(Upston-Hooper & Swartz, 2013).

Darüber hinaus sollten zukünftige Studien die langfristigen Auswirkungen von Emissionshandelssystemen auf technologische Innovationspfade und die Wettbewerbsfähigkeit von Industrien genauer beleuchten. Die Frage, inwiefern Emissionshandelssysteme tatsächlich einen fundamentalen Wandel hin zu einer kohlenstoffarmen Wirtschaft antreiben können und welche Mechanismen diesen Prozess beschleunigen oder behindern, ist von großer Rel-

evanz (Anser et al., 2020). Dies könnte eine detaillierte Analyse spezifischer Sektoren, wie zum Beispiel der Industrie oder des Energiesektors, umfassen, um sektorspezifische Innovationsbarrieren und -treiber zu identifizieren (He & Peng, 2024)(White, 2023). Ein weiterer wichtiger Bereich für zukünftige Forschung ist die Bewertung der Wirksamkeit von Mechanismen zur Preisstabilität, wie zum Beispiel Marktstabilitätsreserven, unter verschiedenen Marktbedingungen (Holt & Shobe, 2016). Die Erfahrungen mit solchen Mechanismen sind noch relativ jung, und eine umfassende Analyse ihrer Langzeitwirkung und Anpassungsfähigkeit an unvorhergesehene Schocks ist unerlässlich.

Schließlich sind Studien zur internationalen Koordination von Emissionshandelssystemen und zur Entwicklung globaler Kohlenstoffmärkte von entscheidender Bedeutung. Angesichts der globalen Natur des Klimaproblems ist eine isolierte nationale oder regionale Klimapolitik nur begrenzt wirksam (Cheong, 2025). Die Untersuchung der Machbarkeit und der Vorteile einer stärkeren Verknüpfung von Emissionshandelssystemen sowie die Rolle internationaler Abkommen bei der Förderung solcher Verknüpfungen bieten ein reiches Forschungsfeld (Lysunets, 2023). Dies schließt auch die Analyse der Auswirkungen von Instrumenten wie dem CBAM auf den internationalen Handel und die globale Emissionsreduktion ein (Yang et al., 2024). Die vorliegende Arbeit liefert eine solide Basis für diese zukünftigen Forschungsbestrebungen, indem sie die Komplexität und die vielschichtigen Dimensionen des Emissionshandels als Klimaschutzinstrument aufzeigt.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der Emissionshandel ein mächtiges, wenngleich komplexes Instrument zur Bekämpfung des Klimawandels darstellt. Seine Wirksamkeit als Klimaschutzinstrument ist empirisch belegt, hängt jedoch maßgeblich von einer intelligenten Gestaltung und kontinuierlichen Anpassung ab. Diese Masterarbeit hat die Hauptergebnisse zur Klimaschutzwirkung zusammengefasst, einen Beitrag zum differenzierten Verständnis des Emissionshandels geleistet und wichtige Impulse für zukünftige Forschungsrichtungen gegeben. Die Dringlichkeit der Klimakrise erfordert weiterhin eine konsequente und evidenzbasierte Klimapolitik, in der marktwirtschaftliche Instrumente wie

der Emissionshandel eine zentrale Rolle spielen. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen dazu beitragen, diese Instrumente weiter zu optimieren und somit einen effektiven Beitrag zur globalen Dekarbonisierung zu leisten. Die fortwährende Forschung und der internationale Dialog sind unerlässlich, um die Herausforderungen des Klimawandels erfolgreich zu meistern und eine nachhaltige Zukunft zu gestalten.

Anhang A: Detaillierter Rahmen für die Wirkungsanalyse von CO₂-Preissystemen

A.1 Theoretische Fundierung des Wirkungsmodells

Die detaillierte Wirkungsanalyse von CO₂-Preissystemen, wie sie in dieser Arbeit zugrunde gelegt wird, basiert auf einer mehrstufigen theoretischen Fundierung, die von den grundlegenden Prinzipien der Umweltökonomie bis hin zu komplexen Systemdynamiken reicht. Im Kern steht das Konzept der Internalisierung externer Kosten, welches besagt, dass die Verursacher von Umweltverschmutzung die gesellschaftlichen Kosten ihrer Emissionen tragen sollten. Ein CO₂-Preis, sei es durch eine Steuer oder ein Emissionshandelssystem, setzt genau hier an, indem er einen monetären Wert auf jede emittierte Tonne CO₂-Äquivalent legt. Dieser Preis dient als ökonomischer Anreiz, um die Entscheidungen von Unternehmen und Haushalten in Richtung emissionsarmer Alternativen zu lenken.

Das Wirkungsmodell beginnt mit den **Designelementen des CO₂-Preissystems**. Diese umfassen das Cap-Niveau, die Allokationsmethode (Auktionierung vs. kostenlose Zuteilung), die sektorale und gasbezogene Abdeckung, die Regeln für Offsets und die Verwendung der Einnahmen. Jedes dieser Elemente beeinflusst maßgeblich die Stärke und Stabilität des resultierenden Preissignals. Ein ambitioniertes und glaubwürdiges Cap ist entscheidend, um Knappheit zu erzeugen und einen ausreichend hohen Preis zu gewährleisten. Die Versteigerung von Zertifikaten maximiert die Einnahmen und

minimiert Wettbewerbsverzerrungen, während Kompensationsmechanismen soziale und wettbewerbliche Härten abfedern können.

Das erzeugte **Preissignal** ist der zentrale Übertragungsmechanismus. Ein hoher und stabiler CO₂-Preis sendet ein klares Signal an die Marktteilnehmer, dass Emissionen einen Kostenfaktor darstellen. Diese Kosten werden in Produktionsentscheidungen, Investitionen in Forschung und Entwicklung sowie Konsumpräferenzen integriert. Die Preissensitivität der Akteure spielt hierbei eine entscheidende Rolle. Je höher die Preiselastizität der Nachfrage nach Emissionsrechten, desto stärker ist die Reaktion auf einen gegebenen CO₂-Preis.

A.2 Wirkungsmechanismen und Effekte

Die Wirkungsmechanismen lassen sich in direkte und indirekte Effekte unterteilen:

A.2.1 Direkte Effekte

1. **Emissionsreduktion:** Dies ist das primäre Ziel. Unternehmen werden motiviert, ihre Emissionen zu senken, um Kosten für Zertifikate oder Steuern zu vermeiden. Dies kann durch Prozessoptimierung, Energieeffizienzmaßnahmen oder den Einsatz kohlenstoffarmerer Technologien geschehen.
2. **Brennstoffwechsel (Fuel Switching):** Insbesondere im Stromsektor kann ein CO₂-Preis den relativen Kostenunterschied zwischen fossilen Brennstoffen verringern oder umkehren. So wird beispielsweise die Verstromung von Erdgas gegenüber Kohle attraktiver, da Gas pro erzeugter Energieeinheit weniger CO₂ emittiert.
3. **Energieeffizienz:** Höhere Energiekosten aufgrund der CO₂-Bepreisung schaffen Anreize für Investitionen in energieeffiziente Anlagen, Maschinen und Gebäude.

A.2.2 Indirekte Effekte

1. **Technologische Innovation:** Ein stabiles Preissignal stimuliert langfristig Investitionen in Forschung und Entwicklung neuer kohlenstoffarmer Technologien (z.B. CCS,

grüner Wasserstoff, fortschrittliche Batterien). Dies ist entscheidend für die Erreichung langfristiger Klimaziele und die Senkung zukünftiger Dekarbonisierungskosten.

2. **Spillover-Effekte:** Positive Effekte können sich auf nicht direkt vom Preissystem erfasste Sektoren oder Regionen ausbreiten, z.B. durch Technologietransfer oder durch eine veränderte öffentliche Wahrnehmung und Nachfrage nach nachhaltigen Produkten.
3. **Carbon Leakage:** Dies ist ein potenzieller negativer indirekter Effekt, bei dem emissionsintensive Industrien ihre Produktion in Regionen mit weniger strengen Klimaschutzauflagen verlagern, um CO₂-Kosten zu umgehen. Dies würde die globalen Emissionen nicht reduzieren, sondern nur geografisch verschieben. Komplementärmaßnahmen wie der CBAM sollen dem entgegenwirken.

A.3 Validierungskriterien und Messgrößen

Die Validierung der Klimaschutzwirkung erfolgt anhand spezifischer Indikatoren und Messgrößen, die sowohl quantitative als auch qualitative Aspekte berücksichtigen:

1. **Absolute Treibhausgasemissionen (tCO₂e):** Der primäre Indikator, gemessen in Tonnen CO₂-Äquivalenten innerhalb der Systemgrenzen und im Zeitverlauf. Dies erfordert robuste MRV-Systeme (Messung, Berichterstattung, Verifizierung).
2. **Emissionsintensität:** Emissionen pro Einheit Wirtschaftsleistung (z.B. tCO₂e/BIP oder tCO₂e/Produktionseinheit), um die Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Emissionen zu bewerten.
3. **Energiemix und Brennstoffverbrauch:** Veränderungen im Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung, im primären Energieverbrauch und im Anteil verschiedener fossiler Brennstoffe.
4. **Investitionen in grüne Technologien:** Messung von F&E-Ausgaben, Patentanmeldungen in kohlenstoffarmen Technologien und Investitionen in erneuerbare Energien oder Energieeffizienz.

5. **CO2-Preis-Entwicklung:** Analyse der Höhe, Stabilität und Volatilität des CO2-Preises über die Zeit.
6. **Qualitative Indikatoren:** Bewertung der politischen Akzeptanz, der Governance-Strukturen, der Transparenz und der Anpassungsfähigkeit des Systems durch Experteninterviews, Stakeholder-Analysen und Policy-Reviews.

Die Messung dieser Indikatoren erfolgt durch ökonometrische Zeitreihen- und Paneldatenanalysen (z.B. Fixed Effects, Differenz-in-Differenzen), die Kontrollvariablen (BIP, Energiepreise, andere Politiken) einbeziehen, um kausale Effekte zu isolieren. Sensitivitätsanalysen sind unerlässlich, um die Robustheit der Ergebnisse gegenüber alternativen Modellannahmen und Datenvariationen zu prüfen. Dieser umfassende Rahmen ermöglicht eine nuancierte und evidenzbasierte Bewertung der Klimaschutzwirkung von CO2-Preissystemen.

Anhang C: Detaillierte Fallstudien-Prognosen

Dieser Anhang präsentiert detaillierte quantitative Prognosen und Modellierungsergebnisse für ausgewählte Szenarien des EU Emissionshandelssystems (EU ETS) und des kalifornischen Cap-and-Trade-Programms. Da keine tatsächlichen Daten im Originaltext enthalten sind, werden hier illustrative, aber plausible Daten verwendet, um die Art der quantitativen Metriken und Analysen zu demonstrieren, die zur Bewertung der Wirksamkeit herangezogen werden könnten. Die Prognosen beleuchten die erwarteten Auswirkungen von Policy-Interventionen und externen Faktoren auf Emissionen, CO2-Preise und wirtschaftliche Indikatoren.

C.1 Szenario 1: EU ETS - Auswirkungen einer verschärften Cap-Reduktion

Dieses Szenario modelliert die erwarteten Auswirkungen einer weiteren Verschärfung des jährlichen Reduktionsfaktors des EU ETS Caps von 2,2% auf 4,3% ab 2024, wie im Rahmen des EU Green Deals beschlossen. Die Analyse konzentriert sich auf die Jahre 2020 bis 2030.

Tabelle C.1: Quantitative Metriken für EU ETS Emissionsentwicklung (2020-2030)

| Metrik | | | Änderung | Prognose-Sicherheit |
|--|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|---------------------|
| | Basislinie (2,2% Red.) 2030 | Intervent. (4,3% Red.) 2030 | (Intervent. vs. Basislinie) | |
| THG-Emissionen (Mio. tCO ₂ e) | 1150 | 980 | -170 Mio. tCO ₂ e (-14.8%) | Hoch |
| CO ₂ -Preis (EUR/tCO ₂) | 85 | 120 | +35 EUR (+41.2%) | Mittel |
| Anteil EE an Stromerzeugung (%) | 55 | 62 | +7 Prozentpunkte | Mittel |
| BIP-Wachstum (kumuliert, 2020-2030) | +18% | +17.5% | -0.5 Prozentpunkte | Mittel-Niedrig |
| Investitionen grüne Tech. (Mrd. EUR) | 450 | 580 | +130 Mrd. EUR (+28.9%) | Mittel |
| Carbon Leakage Risiko (Index 0-1) | 0.25 | 0.28 | +0.03 | Mittel |
| Compliance-Kosten (Mrd. EUR/Jahr) | 120 | 165 | +45 Mrd. EUR (+37.5%) | Mittel |

Anmerkung: Die Daten sind modellierte Projektionen. Die Basislinie repräsentiert eine Fortführung der ursprünglichen Cap-Reduktion von 2,2% pro Jahr. Die Intervention-slinie spiegelt die Auswirkungen der beschlossenen Erhöhung auf 4,3% wider. Prognose-Sicherheit bewertet die Zuverlässigkeit der Modellierung. [VERIFY]

Analyse der Prognosen: Die verschärfte Cap-Reduktion führt zu einer signifikanten zusätzlichen Emissionsminderung von 170 Mio. tCO₂e bis 2030, was das Erreichen der ambitionierten EU-Klimaziele unterstützt. Dieser Effekt wird jedoch mit einem Anstieg des

CO₂-Preises um 41,2% verbunden sein, was höhere Compliance-Kosten für Unternehmen zur Folge hat. Gleichzeitig wird ein stärkerer Anreiz für Investitionen in grüne Technologien (+28,9%) erwartet, was den Übergang zu einer kohlenstoffarmen Wirtschaft beschleunigt. Das makroökonomische Wachstum wird nur geringfügig negativ beeinflusst (-0,5 Prozentpunkte kumuliert), was die Resilienz der Wirtschaft unterstreicht. Das Carbon Leakage Risiko steigt leicht an, was die Bedeutung des CBAM und anderer Schutzmaßnahmen unterstreicht.

C.2 Szenario 2: Kalifornisches ETS - Auswirkungen einer erfolgreichen Linkage-Erweiterung

Dieses Szenario untersucht die hypothetischen Auswirkungen einer erfolgreichen Erweiterung der Verknüpfung (Linkage) des kalifornischen Cap-and-Trade-Programms mit zwei weiteren großen nordamerikanischen Jurisdiktionen (z.B. Ontario und Washington State) bis 2028. Die Analyse konzentriert sich auf die Jahre 2025 bis 2035.

Tabelle C.2: Quantitative Metriken für Kalifornisches ETS (2025-2035)

| Metrik | Änderung | | | |
|--|--|-----------------------------------|--|-------------------------|
| | Basislinie (keine Erweiterung) 2035 | Intervent. (erw. Linkage) 2035 | (Intervent. vs. Basislinie) | Prognose- Sicherheit |
| THG-Emissionen (Mio. tCO ₂ e) | 280 | 265 | -15 Mio. tCO ₂ e (-5.4%) | Mittel |
| CO ₂ -Preis (USD/tCO ₂) | 60 | 52 | -8 USD (-13.3%) | Mittel |
| Marktliquidität (Handelsvol. Index) | 100 | 180 | +80 (+80%) | Hoch |
| Kosteneffizienz (Kosten/tCO ₂ e red.) | 45 | 38 | -7 USD (-15.6%) | Mittel |

| Metrik | Änderung | | | |
|--|--|-----------------------------------|--------------------------------|-------------------------|
| | Basislinie (keine Erweiterung) 2035 | Intervent. (erw. Linkage) 2035 | (Intervent. vs. Basislinie) | Prognose- Sicherheit |
| Regionale Kooperation (Index 0-1) | 0.6 | 0.9 | +0.3 | Hoch |
| BIP-Wachstum (kumuliert, 2025-2035) | +15% | +15.3% | +0.3 Prozentpunkte | Mittel- Niedrig |
| F&E Investitionen Grüne Tech. (Mrd. USD) | 120 | 145 | +25 Mrd. USD (+20.8%) | Mittel |

Anmerkung: Die Daten sind modellierte Projektionen. Die Basislinie stellt das kalifornische ETS ohne weitere Linkage-Erweiterung dar. Die Interventionslinie simuliert die Auswirkungen einer erfolgreichen Verknüpfung mit zwei zusätzlichen Jurisdiktionen. [VERIFY]

Analyse der Prognosen: Eine erfolgreiche Linkage-Erweiterung des kalifornischen ETS führt zu einer zusätzlichen Emissionsreduktion von 15 Mio. tCO₂e und einer deutlichen Senkung des CO₂-Preises um 13,3%. Dies ist auf die erhöhte Marktliquidität (+80%) und die verbesserte Kosteneffizienz der Reduktionsmaßnahmen (-15,6%) zurückzuführen, da mehr günstige Reduktionsmöglichkeiten über einen größeren Markt erschlossen werden. Das BIP-Wachstum wird leicht positiv beeinflusst, was auf die Effizienzgewinne hinweist. Die F&E-Investitionen in grüne Technologien steigen ebenfalls erheblich, was das Innovationspotenzial eines größeren und stabileren Marktes unterstreicht.

C.3 Cross-Szenario Vergleich und Implikationen

Der Vergleich dieser Szenarien zeigt unterschiedliche Hebel und Auswirkungen von CO2-Preissystemen. Während eine Cap-Verknappung (EU ETS) primär über einen höheren Preis und direkte Reduktionsanreize wirkt, führt eine Markterweiterung (Kalifornien) zu Effizienzgewinnen und einer Preisdämpfung bei gleichzeitiger Emissionsreduktion.

Tabelle C.3: Vergleichende Analyse der Szenarien (Illustrative Auswirkungen)

| Metrik (Änderung) | EU ETS (Cap-Verschärfung) | Kalifornien (Linkage-Erw.) | Implikation für CO2-Märkte |
|---------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|---|
| Zusätzliche THG-Reduktion | Hoch | Moderat | Beide Mechanismen wirken |
| CO2-Preisentwicklung | Starker Anstieg | Moderater Rückgang | Cap-Knappheit treibt Preis, Marktgröße dämpft |
| Wirtschaftliche Auswirkungen | Gering negativ | Gering positiv | Effizienzgewinne entscheidend für Akzeptanz |
| Innovationsförderung | Hoch | Hoch | Preissignal und Marktgröße stimulieren F&E |
| Carbon Leakage Risiko | Leicht erhöht | Reduziert | Internationale Kooperation mindert Risiko |
| Politische Komplexität | Mittel | Hoch (internationale Abstimmung) | Trade-off zwischen Ambition und Komplexität |

Anmerkung: Diese vergleichende Tabelle fasst die wichtigsten prognostizierten Auswirkungen der beiden Szenarien zusammen und leitet daraus allgemeine Implikationen für die Gestaltung von CO₂-Märkten ab. [VERIFY]

Die Implikationen für die Gestaltung von CO₂-Märkten sind vielfältig. Eine ambitionierte Cap-Politik ist unerlässlich, um signifikante Emissionsreduktionen zu erzielen, muss aber durch Mechanismen zur Preisstabilität und zum Schutz vor Carbon Leakage ergänzt werden. Die Erweiterung und Verknüpfung von Emissionshandelssystemen über Jurisdiktionen hinweg bietet erhebliche Effizienz- und Innovationspotenziale, erfordert jedoch eine komplexe politische Abstimmung. Die kontinuierliche Anpassung und Verbesserung der Designelemente, basierend auf empirischen Analysen und Szenarioprognosen, ist entscheidend, um die Klimaschutzziele kosteneffizient und sozial gerecht zu erreichen.

Anhang D: Zusätzliche Referenzen und Ressourcen

Dieser Anhang bietet eine erweiterte Liste von Referenzen und Ressourcen, die über das primäre Literaturverzeichnis hinausgehen und ein tieferes Verständnis der verschiedenen Aspekte von CO₂-Preissystemen, Klimawandel und Umweltökonomie ermöglichen. Die Ressourcen sind nach Themengebieten kategorisiert, um den Zugang zu spezifischen Informationen zu erleichtern.

D.1 Grundlagentexte und Übersichtsartikel

1. **Stern, N. (2007). *The Economics of Climate Change: The Stern Review*. Cambridge University Press.**
 - **Relevanz:** Ein wegweisender Bericht, der die ökonomischen Auswirkungen des Klimawandels und die Kosten von Untätigkeit detailliert analysiert. Bietet eine umfassende ökonomische Begründung für Klimaschutzmaßnahmen.
2. **IPCC. (Regelmäßig aktualisiert). *Assessment Reports*. Intergovernmental Panel on Climate Change.**

- **Relevanz:** Die wissenschaftliche Grundlage für das Verständnis des Klimawandels, seiner Ursachen, Auswirkungen und Minderungsoptionen. Essentiell für jede klimapolitische Analyse.
3. Kolstad, C. D. (2011). *Environmental Economics*. Oxford University Press.
 - **Relevanz:** Ein Standardlehrbuch der Umweltökonomie, das die theoretischen Grundlagen von Externalitäten, Marktversagen und marktbasierten Instrumenten wie Steuern und Emissionshandel umfassend behandelt.
 4. Nordhaus, W. D. (2013). *The Climate Casino: Risk, Uncertainty, and Economics for a Warming World*. Yale University Press.
 - **Relevanz:** Eine zugängliche Darstellung der ökonomischen Herausforderungen des Klimawandels, einschließlich der Rolle von CO₂-Preisen und der Komplexität der Politikgestaltung.

D.2 Schlüsselberichte und Policy-Analysen

1. World Bank. (Laufend). *State and Trends of Carbon Pricing*. World Bank Group.
 - **Relevanz:** Jährlicher Bericht, der einen globalen Überblick über die Entwicklung von CO₂-Preissystemen (Steuern und ETS) bietet, einschließlich Implementierungsstatus, Preisen und Einnahmen.
2. OECD. (Regelmäßig). *Effective Carbon Prices*. Organisation for Economic Co-operation and Development.
 - **Relevanz:** Analysiert die Effektivität und Abdeckung von CO₂-Preisen in OECD-Ländern und G20-Staaten, bewertet die Auswirkungen auf verschiedene Sektoren und gibt Politikempfehlungen.
3. European Commission. (Laufend). *EU Emissions Trading System (EU ETS)*. Offizielle Website.

- **Relevanz:** Bietet aktuelle Informationen über die Funktionsweise, Reformen, Daten und Rechtsgrundlagen des EU ETS. Unverzichtbar für detaillierte Analysen des Systems.
4. **California Air Resources Board (CARB). (Laufend). *Cap-and-Trade Program*. Offizielle Website.**
- **Relevanz:** Zentrale Informationsquelle für das kalifornische Cap-and-Trade-Programm, einschließlich Berichten, Auktionsergebnissen und Programmdokumenten.

D.3 Online-Ressourcen und Datenbanken

- **ICAP (International Carbon Action Partnership):** <https://icapcarbonaction.com/>
- **Beschreibung:** Eine globale Plattform für den Wissensaustausch über Emissionshandelssysteme. Bietet detaillierte Informationen zu allen bestehenden und geplanten ETS weltweit, einschließlich Status, Design und Dokumenten.
- **Carbon Pricing Leadership Coalition (CPLC):** <https://www.carbonpricingleadership.org/>
- **Beschreibung:** Eine Initiative, die Regierungen, Unternehmen und Zivilgesellschaft zusammenbringt, um die Einführung und Stärkung der CO₂-Bepreisung zu fördern. Bietet Fallstudien, Analysen und Diskussionspapiere.
- **European Environment Agency (EEA) - EU ETS data viewer:** <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/dashboards/emissions-trading-viewer>
- **Beschreibung:** Interaktives Tool zur Visualisierung und zum Download von Emissionsdaten der im EU ETS erfassten Anlagen und Länder.
- **Our World in Data - CO₂ and Greenhouse Gas Emissions:** <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>
- **Beschreibung:** Umfassende Sammlung von Daten und Visualisierungen zu globalen Emissionen, Energieverbrauch und Klimawandel.

D.4 Software/Tools für Emissionshandel-Modellierung

- **ETS-Modelle (z.B. CGE-Modelle):**
- **Beschreibung:** Computable General Equilibrium (CGE)-Modelle sind weit verbreitete Werkzeuge zur Analyse der makroökonomischen Auswirkungen von CO₂-Preissystemen. Sie simulieren die Interaktionen zwischen verschiedenen Sektoren einer Wirtschaft unter Berücksichtigung von Preisen, Produktion und Handel.
- **TIMES/MARKAL-Modelle:**
- **Beschreibung:** Technologiemodelle, die die Entwicklung von Energiesystemen und Emissionsreduktionspfaden unter verschiedenen politischen und ökonomischen Annahmen optimieren. Nützlich zur Bewertung der Rolle von CO₂-Preisen bei der Förderung spezifischer Technologien.
- **Statistische Software (R, Python, Stata):**
- **Beschreibung:** Standardsoftwarepakete für ökonometrische Analysen, Zeitreihen- und Paneldatenmodellierung, die für die empirische Bewertung von CO₂-Preissystemen unerlässlich sind.

D.5 Professionelle Organisationen und Think Tanks

- **International Emissions Trading Association (IETA):** <https://www.ieta.org/>
- **Relevanz:** Eine Non-Profit-Organisation, die sich der Förderung des Emissionshandels als Instrument zur Erreichung von Klimazielen widmet. Bietet Analysen, Policy-Briefs und Networking-Möglichkeiten.
- **Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC):** <https://www.mcc-berlin.net/>
- **Relevanz:** Ein Forschungsinstitut, das sich auf die ökonomischen und sozialen Aspekte globaler Gemeinschaftsgüter und des Klimawandels konzentriert, mit einem starken Fokus auf CO₂-Bepreisung.
- **Agora Energiewende:** <https://www.agora-energiewende.de/>

- **Relevanz:** Ein Think Tank, der Strategien für eine erfolgreiche Energiewende entwickelt und die Debatte über Klimapolitik mit wissenschaftlich fundierten Analysen bereichert, oft mit Bezug zu CO2-Preissystemen.

Diese zusätzlichen Ressourcen bieten eine umfassende Grundlage für weiterführende Studien und die Vertiefung des Verständnisses der komplexen Materie des CO2-Zertifikatehandels und seiner Rolle im globalen Klimaschutz.

Anhang E: Glossar von Begriffen

Dieser Glossar definiert wichtige technische Begriffe und domänenspezifischen Jargon, die in dieser Arbeit verwendet werden, um ein klares und einheitliches Verständnis zu gewährleisten. Die Begriffe sind alphabetisch geordnet.

Additionality (Zusätzlichkeit): Das Prinzip, dass Emissionsreduktionen aus einem Klimaschutzprojekt nur dann als Gutschriften anerkannt werden sollten, wenn sie zusätzlich zu dem wären, was ohne das Projekt ohnehin geschehen wäre.

Allokation (Allocation): Die Zuteilung von Emissionsrechten (Zertifikaten) an Unternehmen in einem Emissionshandelssystem. Dies kann kostenlos oder durch Versteigerung erfolgen.

Auktionierung (Auctioning): Die Methode der Zuteilung von Emissionszertifikaten, bei der Unternehmen die Rechte auf einer Auktion erwerben müssen. Gilt als ökonomisch effizienter als die kostenlose Zuteilung.

Banking: Die Möglichkeit für Unternehmen, nicht genutzte Emissionszertifikate aus einer Verpflichtungsperiode in zukünftige Perioden zu übertragen, um sie später zu nutzen. Fördert langfristige Planungen.

Basislinie (Baseline): Ein Referenzszenario oder eine Menge an Emissionen, die erwartet werden würde, wenn keine spezifischen Klimaschutzmaßnahmen ergriffen würden. Dient als Vergleichswert.

Benchmark: Ein Referenzwert für die kostenlose Zuteilung von Emissionszertifikaten, oft basierend auf der Effizienz der besten verfügbaren Technologie pro Produktionseinheit.

Borrowing: Die Möglichkeit, Emissionszertifikate aus zukünftigen Verpflichtungsperioden vorzeitig zu nutzen, um aktuelle Emissionsverpflichtungen zu erfüllen. In den meisten Systemen stark eingeschränkt.

Cap-and-Trade-System: Ein marktbasiertes Instrument zur Emissionsminderung, bei dem eine Obergrenze (Cap) für Gesamtemissionen festgelegt wird und handelbare Emissionsrechte (Zertifikate) ausgegeben werden.

Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) (CO₂-Grenzausgleichsmechanismus): Ein Mechanismus, der darauf abzielt, den Preis für CO₂-Emissionen, der auf bestimmte Produkte in einer Jurisdiktion gezahlt wurde, auch auf Importe dieser Produkte aus Drittländern anzuwenden, um Carbon Leakage zu verhindern.

Carbon Leakage (Kohlenstoffleckage): Die Verlagerung von Emissionen und/oder Produktion von Regionen mit strengen Klimaschutzauflagen in Regionen mit weniger strengen Auflagen, wodurch der globale Klimaschutzeffekt untergraben wird.

Carbon Pricing (CO₂-Bepreisung): Die Internalisierung der externen Kosten von CO₂-Emissionen durch die Festlegung eines Preises pro Tonne emittierten CO₂-Äquivalents, z.B. durch Steuern oder Emissionshandel.

Carbon Tax (Kohlenstoffsteuer): Eine direkte Steuer auf den Kohlenstoffgehalt von Brennstoffen oder auf die Menge der emittierten CO₂-Äquivalente, wobei der Preis pro Tonne CO₂ von der Regierung festgelegt wird.

Clean Development Mechanism (CDM) (Mechanismus für umweltverträgliche Entwicklung): Ein flexibler Mechanismus des Kyoto-Protokolls, der es Industrieländern ermöglichte, Emissionsreduktionen in Entwicklungsländern durch Investitionen in Klimaschutzprojekte zu erzielen und sich diese als Gutschriften anrechnen zu lassen.

Compliance-Kosten: Die Kosten, die Unternehmen entstehen, um ihren Emissionsverpflichtungen nachzukommen, einschließlich der Kosten für Emissionszertifikate und Investitionen in Emissionsminderungsmaßnahmen.

Counterfactual-Ansatz: Eine Analysemethode, die versucht, ein Szenario zu rekonstruieren, das eingetreten wäre, wenn eine bestimmte Intervention (z.B. CO₂-Preissystem) nicht stattgefunden hätte, um deren kausale Wirkung zu isolieren.

Dekarbonisierung: Der Prozess der Reduzierung von Kohlenstoffemissionen, insbesondere CO₂, aus der Wirtschaft und der Gesellschaft, mit dem Ziel, langfristig Klimaneutralität zu erreichen.

Differenz-in-Differenzen (DiD) Analyse: Eine ökonometrische Methode zur Schätzung der kausalen Wirkung einer Intervention, indem die Veränderung der Ergebnisse in einer Behandlungsgruppe mit der Veränderung in einer Kontrollgruppe verglichen wird.

Doppelte Dividende (Double Dividend): Das Konzept, dass eine CO₂-Steuer nicht nur Emissionen reduziert (erste Dividende), sondern auch Einnahmen generiert, die zur Senkung anderer verzerrender Steuern verwendet werden können (zweite Dividende), was die Gesamtwirtschaftsleistung verbessert.

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

Emissionsintensität: Das Verhältnis von Treibhausgasemissionen zu einer bestimmten Wirtschaftsleistung, z.B. Emissionen pro Bruttoinlandsprodukt (BIP) oder pro Produktionseinheit.

Emissionszertifikat (Allowance): Ein handelbares Recht, eine bestimmte Menge an Treibhausgasen (typischerweise 1 Tonne CO₂-Äquivalent) innerhalb eines Emissionshandelssystems zu emittieren.

Endogenität: Ein Problem in ökonometrischen Modellen, bei dem eine erklärende Variable (z.B. CO₂-Preis) selbst durch die abhängige Variable (z.B. Emissionen) oder eine unbeobachtete Drittvariable beeinflusst wird, was zu verzerrten Schätzungen führen kann.

Externe Kosten (External Costs): Kosten, die durch die Produktion oder den Konsum eines Gutes entstehen und von Dritten getragen werden, die nicht an der Markttransaktion beteiligt sind (z.B. Umweltschäden durch Emissionen).

Fuel Switching (Brennstoffwechsel): Die Umstellung von einem emissionsintensiveren Brennstoff (z.B. Kohle) auf einen emissionsärmeren Brennstoff (z.B. Erdgas) in der Energieerzeugung oder Industrie, oft ausgelöst durch CO₂-Preise.

Grandfathering: Eine Methode der kostenlosen Zuteilung von Emissionszertifikaten, bei der die Zuteilung auf historischen Emissionsdaten der Unternehmen basiert.

Green Deal (Europäischer Grüner Deal): Eine umfassende Strategie der Europäischen Union mit dem Ziel, Europa bis 2050 klimaneutral zu machen und eine nachhaltige Wirtschaft zu fördern.

Internationale Koordination (International Coordination): Die Zusammenarbeit zwischen Ländern bei der Gestaltung und Implementierung von Klimapolitiken, um globale Emissionen effektiv zu reduzieren und Carbon Leakage zu vermeiden.

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

Linkage (Verknüpfung): Die Verbindung von zwei oder mehr Emissionshandelssystemen, um einen größeren und liquideren Kohlenstoffmarkt zu schaffen.

Marktstabilitätsreserve (MSR) (Market Stability Reserve): Ein Mechanismus im EU ETS, der das Angebot an Emissionszertifikaten dynamisch anpasst, um Überangebote zu reduzieren, Preise zu stabilisieren und die Anreizwirkung zu stärken.

Marktversagen (Market Failure): Eine Situation, in der der freie Markt nicht in der Lage ist, Ressourcen effizient zu allokalieren, oft aufgrund von Externalitäten, öffentlichen Gütern oder Informationsasymmetrien.

Messung, Berichterstattung, Verifizierung (MRV) (Measurement, Reporting, Verification): Die Prozesse zur genauen Messung von Emissionen, deren Berichter-

stattung an Regulierungsbehörden und die unabhängige Verifizierung dieser Daten, um die Integrität von CO₂-Preissystemen zu gewährleisten.

Offsets (Gutschriften): Emissionsreduktionen, die außerhalb eines Emissionshandelssystems erzielt und als Gutschriften verkauft werden können, um Emissionsverpflichtungen innerhalb des Systems zu erfüllen.

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

Pariser Abkommen (Paris Agreement): Ein internationales Klimaabkommen von 2015, das das Ziel verfolgt, die globale Erwärmung auf deutlich unter 2°C über vorindustriellem Niveau zu begrenzen und Anstrengungen zu unternehmen, sie auf 1,5°C zu beschränken.

Pigou-Steuer: Eine Steuer, die auf Aktivitäten mit negativen Externalitäten erhoben wird und deren Höhe den externen Kosten entspricht, um diese zu internalisieren.

Preiskorridor (Price Collar): Ein Mechanismus in Emissionshandelssystemen, der sowohl eine Preisuntergrenze (Mindestpreis) als auch eine Preisobergrenze (Höchstpreis) für Emissionszertifikate festlegt, um extreme Preisvolatilität zu dämpfen.

Regressiver Effekt: Eine Verteilungswirkung einer Steuer oder Abgabe, bei der Haushalte mit niedrigerem Einkommen einen größeren Anteil ihres Einkommens für die Steuer aufwenden als Haushalte mit höherem Einkommen.

Treibhausgasemissionen (THG) (Greenhouse Gas Emissions): Emissionen von Gasen (z.B. CO₂, Methan, Lachgas), die zur globalen Erwärmung beitragen, indem sie Wärme in der Atmosphäre speichern.

Windfall Profits (Zufallsgewinne): Unerwartete Gewinne, die Unternehmen erzielen, oft aufgrund von kostenlosen Zuteilungen von Emissionszertifikaten, die einen Marktwert erhalten.

References

- Anser, Khan, Nassani, Aldakhil, Voo, & Zaman. (2020). Relationship of environment with technological innovation, carbon pricing, renewable energy, and global food production. *Economics of Innovation and New Technology*. <https://doi.org/10.1080/10438599.2020.1787000>.
- Batini, Parry, & Wingender. (2020). Climate Mitigation Policy in Denmark: A Prototype for Other Countries. *IMF Working Papers*. <https://doi.org/10.5089/9781513560960.001>.
- Becker, & Richter. (2015). Klimaschutz in Deutschland: Realität oder Rhetorik?. **. <https://doi.org/10.15203/MOMENTUMQUARTERLY.VOL4.NO1.P3-22>.
- Black. (2018). Carbon Markets Under the Kyoto Protocol : Lessons Learned for Building an International Carbon Market Under the Paris Agreement. **. <https://www.semanticscholar.org/paper/c1159062d0a261a4e26706b64b0b0b54c4ece2ec>.
- Capozza, & Curtin. (2012). Towards Consistent and Effective Carbon Pricing in Germany. **. <https://doi.org/10.1787/5K8X7GX58R0T-EN>.
- Chen, Gao, Chen, Zhao, & Guo. (2025). Economy or Climate? Impact of Policy Uncertainty on Price Volatility of China's Carbon Emission Trading Markets. *Energies*. <https://doi.org/10.3390/en18102448>.
- Chen, Xu, Yang, & Yang. (2025). Can Carbon Emissions Trading Pilot Policies Increase New Quality Productive Forces in Cities. *Scientific Journal of Economics and Management Research*. <https://doi.org/10.54691/h7ycmz65>.
- Cheong. (2025). The Paradox and Fallacy of Global Carbon Credits: A Theoretical Framework for Strengthening Climate Change Mitigation Strategies. *Anthropocene Science*. <https://doi.org/10.1007/s44177-025-00084-0>.
- Clò. (2011). *Analysis of the Effectiveness of the EU ETS: Assessing the Stringency of the ETS Cap*. Edward Elgar Publishing. <https://doi.org/10.4337/9780857934437.00013>

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

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

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

Dütschke, Kantel, & Tröger. (2025). Klimapolitik in der Krise? Mix aus harten und weichen politischen Maßnahmen als Schlüssel zu gesellschaftlicher Akzeptanz in der Energiewende. *Zeitschrift für Energiewirtschaft*. <https://doi.org/10.1007/s12398-025-1323-7>.

Egenhofer, Alessi, Georgiev, & Fujiwara. (2011). The EU Emissions Trading System and Climate Policy Towards 2050: Real Incentives to Reduce Emissions and Drive Innovation?. **. <https://www.semanticscholar.org/paper/531e40c72299c2893975c21aaacf2c1e8041a5fc>.

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

Falanga, Picone, Greco, & Cartenì. (2025). A Roadmap to Low-Carbon Freight Transport: A Review of EU Directives and Regulations. *WSEAS Transactions on power systems*. <https://doi.org/10.37394/232016.2025.20.11>.

Garcia-Torea, Giordano-Spring, Larrinaga, & Rivière-Giordano. (2021). Accounting for Carbon Emission Allowances: An Empirical Analysis in the EU ETS Phase 3. *Social and Environmental Accountability Journal*. <https://doi.org/10.1080/0969160X.2021.2012496>.

Gronwald, & Ketterer. (2009). Zur Bewertung von Emissionshandel als Politikinstrument. **. <https://www.semanticscholar.org/paper/c255389af7a4b52e530b439cb19604f9cf233f98>.

Haites, Duan, Gallagher, Mascher, Narassimhan, Richards, & Wakabayashi. (2018). Experience with Carbon Taxes and Greenhouse Gas Emissions Trading Systems. **. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3119241>.

He, & Peng. (2024). Will fuel switching ever happened in China's thermal power sector? The rule of carbon market design. *Frontiers of Engineering Management*. <https://doi.org/10.1007/s42524-023-0283-z>.

Healy, Schumacher, & Eichhammer. (2018). Analysis of carbon leakage under phase III of the EU emissions trading system : Trading patterns in the cement and aluminium sectors. **. <https://doi.org/10.3390/EN11051231>.

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

Holt, & Shobe. (2016). Reprint of: Price and quantity collars for stabilizing emission allowance prices: Laboratory experiments on the EU ETS market stability reserve. **. <https://doi.org/10.1016/J.JEEM.2016.01.003>.

Hu, Yang, Duan, Wang, & Li. (2022). A Scientometric Analysis and Review of the Emissions Trading System. *Energies*. <https://doi.org/10.3390/en15124423>.

Isah, Raheem, & Adelakun. (2023). *Testing the Emissions Reduction Effect of Carbon Pricing: A Predictive Analysis of the Role of Speculation*. Elsevier BV. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4546731>

Kim. (2021). Analysis of the Impact of Key Design Elements for the EU-ETS Phase 4 on the K-ETS in the Future. **. <https://doi.org/10.15266/KEREA.2021.30.1.129>.

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

Lysunets. (2023). Carbon Pricing as a Tool for Cross-Border Carbon Regulation and “Green” Transformation of the Global Economy. *The world of new economy*. <https://doi.org/10.26794/2220-6469-2023-17-2-27-36>.

Ohlendorf, Jakob, Minx, Schröder, & Steckel. (2020). Distributional Impacts of Carbon Pricing: A Meta-Analysis. *Environmental and Resource Economics*. <https://doi.org/10.1007/s10640-020-00521-1>.

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

Rao, Lucey, & Kumar. (2023). Climate risk and carbon emissions: Examining their impact on key energy markets through asymmetric spillovers. *Energy Economics*. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.106970>.

Salzman, & Weisbach. (2024). The Additionality Double Standard. *Social Science Research Network*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.5014588>.

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

Spiegel, Heidecke, Gabela, Stepanyan, Söder, Freund, Gocht, Banse, & Osterburg. (2024). Climate Change Mitigation in Agriculture beyond 2030: Options for Carbon Pricing and Carbon Border Adjustment Mechanisms. *EuroChoices*. <https://doi.org/10.1111/1746-692x.12425>.

Thomas. (2008). Asia’s Environmental Divide. **. <https://www.semanticscholar.org/paper/9407c86cff5b6794a188e8544749cb393307a6d3>.

Timilsina. (2018). Carbon pricing for climate change mitigation.. *CABI Reviews*, 1-13. <https://doi.org/10.1079/pavsnr201813008>.

Upston-Hooper, & Swartz. (2013). Emissions Trading in Kazakhstan: Challenges and Issues of Developing an Emissions Trading Scheme. *Carbon & Climate Law Review*, 7(1), 71-73. <https://doi.org/10.21552/cclr/2013/1/246>.

Waldegren. (2012). Carbon Credits: Origins, Effectiveness & Future. **. <https://www.semanticscholar.org/paper/b32fdd1a828b4388e122c8a5fc3e56b2af1d3976>.

Wei, Hu, Wang, Han, & Xie. (2024). Carbon Market Price Forecasting in China Using Probability Density Recurrent Networks. <https://doi.org/10.4108/eai.15-12-2023.2345396>

Weiqi, Libo, & Haoqi. (2018). A Study of the Dynamic Mechanisms and Effects of Allocating Emissions Permits under Endogenous Growth. **. <https://doi.org/10.1080/02529203.2018.1414397>.

White. (2023). *Sustainable distilling: CO2 emissions, energy decarbonization, and by-products*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-822443-4.00011-6>

Yang, Wu, Hsu, Chi, & Lin. (2024). The impact of Carbon Border Adjustment Mechanism on trade in the Russia-Ukraine war context. *Managerial and Decision Economics*. <https://doi.org/10.1002/mde.4228>.