

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

KI-generiertes akademisches Thesis-Showcase

Akademische Thesis KI (Multi-Agenten-System)

Januar 2025

Table of Contents

Abstract	1
Einleitung	2
Literaturübersicht	3
1. Geschichte des Emissionshandels	4
2. Theoretische Grundlagen der Umweltökonomie	8
3. CO ₂ -Preismechanismen und Klimaschutz	12
4. Empirische Studien zur Wirksamkeit	16
5. Kritische Perspektiven und Herausforderungen	20
6. Vergleich der Designelemente von Emissionshandelssystemen	24
Methodik	25
2.1 Analyserahmen für die Klimaschutzwirkung von Emissionshandelssystemen	26
Abbildung 1: Conceptual Framework for ETS Impact Assessment	28
2.2 Auswahlkriterien für Fallstudien	28
2.3 Datenquellen und Messverfahren	30
2.4 Statistische Methoden zur Wirksamkeitsanalyse	33
Analyse	36
1. Emissionsreduktionen durch CO ₂ -Handel	37
Abbildung 2: Prozessablauf eines Emissionshandelssystems (Cap-and-Trade)	40
2. Preisgestaltung und Marktmechanismen	40
Tabelle 2: Entwicklung der CO ₂ -Preise und Emissionsreduktionen im EU-ETS (2005-2022)	43
3. Fallstudien (EU ETS, Kalifornien, China)	44
Tabelle 4: Vergleich der Emissionsintensität in ausgewählten Sektoren (EU ETS vs. Kalifornien)	47
4. Vergleich mit anderen Klimaschutzinstrumenten	50

5. Empirische Belege für Klimaschutzwirkung	54
Tabelle 3: Innovationsmetriken in ETS-regulierten Sektoren	57
Diskussion	60
1. Implikationen für Klimapolitik	61
2. Grenzen und Herausforderungen des Emissionshandels	62
3. Verbesserungsvorschläge für CO ₂ -Märkte	64
4. Rolle im globalen Klimaschutz	66
5. Empfehlungen für Politik und Wirtschaft	69
Einschränkungen	71
Methodische Einschränkungen	71
Konzeptuelle und Theoretische Einschränkungen	71
Räumliche und Zeitliche Einschränkungen	72
Datenbezogene Einschränkungen	72
Grenzen der Übertragbarkeit	73
Zukünftige Forschungsrichtungen	73
1. Vertiefte Analyse der Interaktion von EHS und anderen Klimapolitiken .	74
2. Optimierung von Marktstabilitätsmechanismen und Preisgestaltung . .	74
3. Ausweitung des Geltungsbereichs und sektorale Integration	74
4. Internationale Verknüpfung und globale Kohlenstoffmärkte	75
5. Soziale Gerechtigkeit und Verteilungswirkungen	75
6. Carbon Leakage und Grenzausgleichsmechanismen (CBAM)	76
7. Rolle von EHS in Schwellen- und Entwicklungsländern	76
Fazit	77
Appendix A: Analysemodell zur Bewertung der Klimaschutzwirkung von Emissionshandelssystemen	81
A.1 Theoretische Fundierung des Modells	81
A.2 Struktur des Analysemodells	81

A.3 Interdependenzen und Wirkungsketten	82
A.4 Validierungskriterien	83
Appendix C: Detaillierte Fallstudien-Metriken und Projektionen	83
C.1 Szenario 1: EU ETS - Emissions- und Preisentwicklung	83
C.2 Szenario 2: Kalifornisches Cap-and-Trade - Emissions- und Preisentwicklung	84
C.3 Szenario 3: Nationales Chinesisches EHS - Intensitätsziele und Herausforderungen	85
C.4 Cross-Scenario Comparison	86
Appendix D: Weiterführende Literatur und Ressourcen	87
D.1 Grundlagenwerke und Fachbücher	87
D.2 Schlüsselartikel und Berichte	88
D.3 Online-Ressourcen und Institutionelle Berichte	88
D.4 Software und Tools	89
D.5 Professionelle Organisationen und Think Tanks	89
Appendix E: Glossar wichtiger Begriffe	90
Literaturverzeichnis	93

Abstract

Forschungsproblem und Ansatz: Die Menschheit steht vor den gravierenden Folgen des Klimawandels, der sich als eine der größten globalen Herausforderungen erweist. Diese Arbeit untersucht kritisch die Frage, ob der Handel mit CO2-Zertifikaten nachweislich zu einer signifikanten Verlangsamung des menschengemachten Klimawandels führt. Der Ansatz konzentriert sich auf eine umfassende Analyse der Wirkungsmechanismen, empirischen Belege und Herausforderungen von Emissionshandelssystemen (EHS).

Methodik und Ergebnisse: Die Methodik umfasst eine Literaturanalyse, Fallstudien (EU ETS, Kalifornien, China) und die Synthese empirischer Studien. Es wird festgestellt, dass EHS signifikante Emissionsreduktionen bewirken, technologische Innovationen fördern und die Kosteneffizienz des Klimaschutzes erhöhen. Trotzdem bestehen Herausforderungen wie Preisvolatilität und Carbon Leakage, die jedoch durch verbesserte Marktmechanismen und begleitende Politiken adressiert werden können.

Wichtigste Beiträge: (1) Eine differenzierte Bewertung der Klimaschutzwirkung von EHS unter Berücksichtigung ökonomischer und technologischer Dynamiken. (2) Die Identifizierung von Best Practices und Designelementen für effektive CO2-Märkte. (3) Die Ableitung konkreter Empfehlungen für Politik und Wirtschaft zur Optimierung von Emissionshandelssystemen im globalen Klimaschutz.

Implikationen: Die Ergebnisse unterstreichen die unverzichtbare Rolle von EHS als leistungsfähiges Instrument im Kampf gegen den Klimawandel. Sie sind entscheidend für die Erreichung globaler Klimaziele und erfordern kontinuierliche Anpassung und internationale Koordination. Diese Erkenntnisse sind relevant für Entscheidungsträger, die nachhaltige Klimapolitiken gestalten und umsetzen.

Keywords: Emissionshandel, CO2-Zertifikate, Klimawandel, Klimapolitik, EU ETS, Carbon Leakage, Marktmechanismen, Dekarbonisierung, Umweltökonomie, Technologische Innovation, Nachhaltigkeit, Kohlenstoffmärkte, Kyoto-Protokoll, Pariser Abkommen

Einleitung

Die Menschheit steht an einem entscheidenden Punkt. Wir sind mit den gravierenden Folgen des Klimawandels konfrontiert, der sich als eine der größten globalen Herausforderungen unserer Zeit erweist (Abrha, 2025)(Digitemie & Ekemezie, 2024). Die Wissenschaft ist sich einig: Die globale Durchschnittstemperatur steigt schnell an. Hauptursache sind menschliche Emissionen von Treibhausgasen, vor allem Kohlendioxid (CO₂) (Dagiliūtė & Kazanaviciute, 2024). Diese Entwicklung führt zu häufigeren Extremwetterereignissen, einem Anstieg des Meeresspiegels und der Versauerung der Ozeane. Auch die Biodiversität ist bedroht. All dies zieht tiefgreifende ökologische, soziale und ökonomische Folgen nach sich (Rutty et al., 2022)(sustainabilityperformances.eu, 2025). Die Notwendigkeit, wirksame Strategien zur Reduktion dieser Emissionen zu entwickeln und anzuwenden, ist offensichtlich. Sie ist mittlerweile zum Schwerpunkt internationaler Politik und Forschung geworden (Freestone & Streck, 2005)(climate.ec.europa.eu, 2025). Ohne konsequentes Handeln drohen unumkehrbare Schäden für Ökosysteme und menschliche Gesellschaften. Dies unterstreicht die Dringlichkeit eines grundlegenden Wandels in der globalen Energieerzeugung und unserem Konsumverhalten (Olhoff et al., 2022).

Der Klimawandel ist nicht nur eine ökologische, sondern auch eine große ökonomische und soziale Bedrohung. Experten erwarten, dass die Kosten von Untätigkeit die Kosten von Klimaschutzmaßnahmen deutlich übertreffen werden (Digitemie & Ekemezie, 2024)(imf.org, 2025). Dazu zählen direkte Schäden durch Naturkatastrophen, Verluste in der Landwirtschaft, Gesundheitsrisiken und mögliche Unruhen in Regionen infolge von Ressourcenknappheit und klimabedingter Migration (Rutty et al., 2022). Zudem können die Auswirkungen des Klimawandels soziale Ungleichheiten verstärken, denn benachteiligte Gruppen sind oft am stärksten betroffen und haben weniger Mittel zur Anpassung (Abrha, 2025). Die Bewältigung dieser komplexen Herausforderung erfordert daher ein umfassendes und koordiniertes Vorgehen auf allen Ebenen.

Literaturübersicht

Die globale Klimakrise stellt eine der drängendsten Herausforderungen des 21. Jahrhunderts dar und erfordert umfassende und effektive politische Maßnahmen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen (Digitemie & Ekemezie, 2024)(Vadhava & Khanna, 2025). Vor diesem Hintergrund haben sich marktwirtschaftliche Instrumente als vielversprechende Ansätze etabliert, um Emissionen kosteneffizient zu mindern und gleichzeitig Innovationen im Bereich kohlenstoffärmer Technologien zu fördern (Chen et al., 2024). Insbesondere Emissionshandelssysteme (EHS), auch bekannt als Cap-and-Trade-Systeme, haben weltweit an Bedeutung gewonnen und bilden einen Eckpfeiler der Klimapolitik in vielen Jurisdiktionen, darunter die Europäische Union, Teile Nordamerikas und Asiens (worldbank.org, 2025)(umweltbundesamt.de, 2025). Diese Literaturübersicht zielt darauf ab, die wissenschaftliche Diskussion über Emissionshandelssysteme, Kohlenstoffmärkte und ihre Rolle in der Klimapolitik umfassend darzustellen. Sie beleuchtet die historische Entwicklung, die theoretischen Grundlagen der Umweltökonomie, die Funktionsweise verschiedener CO₂-Preismechanismen, empirische Erkenntnisse über deren Wirksamkeit sowie kritische Perspektiven und zukünftige Herausforderungen.

Die Analyse der bestehenden Forschung beginnt mit der Entstehungsgeschichte des Emissionshandels, die ihre Wurzeln in internationalen Abkommen wie dem Kyoto-Protokoll und der anschließenden Implementierung regionaler Systeme wie dem EU-Emissionshandelssystem (EU ETS) hat (Ribeiro et al., 2024)(Klimko & Hasprová, 2025). Darauf aufbauend werden die ökonomischen Theorien untersucht, die den Emissionshandel untermauern, insbesondere Konzepte des Marktversagens, externer Effekte und der Instrumente der Umweltpolitik (Abrha, 2025). Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf den verschiedenen CO₂-Preismechanismen und ihren Designelementen, die für ihre Effektivität im Klimaschutz entscheidend sind (Edenhofer et al., 2019). Die empirische Forschung zur Wirksamkeit dieser Systeme wird kritisch beleuchtet, indem Studien zu

Emissionsreduktionen, wirtschaftlichen Auswirkungen und technologischen Innovationen zusammengefasst werden (Klimko & Hasprová, 2025)(Chen et al., 2024). Schließlich werden kritische Perspektiven und Herausforderungen wie Carbon Leakage, Preisvolatilität und Gerechtigkeitsfragen diskutiert, um ein umfassendes Bild der aktuellen Debatte zu zeichnen (Naegele & Zaklan, 2017)(Betz et al., 2022). Das Ziel ist es, ein fundiertes Verständnis der Rolle von Emissionshandelssystemen im globalen Klimaschutz zu vermitteln und die Grundlage für die weitere Analyse in dieser Arbeit zu legen.

1. Geschichte des Emissionshandels

Die Geschichte des Emissionshandels ist eng mit der wachsenden Erkenntnis über die Notwendigkeit des Klimaschutzes und der Suche nach effizienten politischen Instrumenten zur Emissionsreduktion verbunden. Sie reicht von den frühen theoretischen Überlegungen in der Umweltökonomie bis hin zur Implementierung komplexer internationaler und regionaler Handelssysteme (Raufer & Iyer, 2012).

1.1 Ursprünge und theoretische Vorläufer Die Idee, Umweltprobleme durch marktwirtschaftliche Mechanismen zu lösen, hat ihre Wurzeln in den Arbeiten von Ökonomen des 20. Jahrhunderts. Ronald Coase formulierte 1960 sein berühmtes Coase-Theorem, das besagt, dass bei klar definierten Eigentumsrechten und niedrigen Transaktionskosten private Parteien effiziente Lösungen für externe Effekte finden können, unabhängig von der ursprünglichen Zuweisung der Eigentumsrechte (Kahneman et al., 1990). Obwohl das Coase-Theorem in der Praxis aufgrund hoher Transaktionskosten und unklarer Eigentumsrechte auf Umweltgüter oft schwer anwendbar ist, legte es den Grundstein für die Idee, dass Märkte eine Rolle bei der Internalisierung externer Kosten spielen könnten.

Eine weitere wichtige theoretische Grundlage lieferte Arthur Pigou Anfang des 20. Jahrhunderts mit dem Konzept der Pigou-Steuern (Lotz et al., 2008). Er schlug vor, dass externe Kosten, wie die Umweltverschmutzung, durch eine Steuer internalisiert werden sollten,

die dem Ausmaß des Schadens entspricht. Während Pigou-Steuern eine direkte Preissetzung für Emissionen darstellen, bieten sie einen klaren Anreiz zur Reduktion. Die Idee des Emissionshandels, bei dem ein “Cap” für Emissionen festgelegt und dann Emissionsrechte gehandelt werden, entstand als eine Weiterentwicklung dieser marktbasierter Ansätze, um eine kosteneffiziente Reduktion zu gewährleisten (Raufer & Iyer, 2012). Hierbei wird nicht der Preis direkt festgelegt, sondern die Menge der Emissionen, wodurch der Markt den Preis für die Emissionsrechte bestimmt.

Die eigentliche praktische Anwendung von Handelssystemen für Umweltgüter begann in den Vereinigten Staaten in den 1970er und 1980er Jahren, insbesondere mit Programmen zur Reduzierung von Schwefeldioxid (SO₂)-Emissionen (Ellerman & Harrison, 2003). Diese frühen Erfahrungen, die zeigten, dass Handelssysteme effektiv und kostengünstig sein können, ebneten den Weg für die Übertragung des Konzepts auf Treibhausgasemissionen auf internationaler Ebene.

1.2 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 (Ribeiro et al., 2024)(Freestone & Streck, 2005). Das Protokoll basierte auf dem Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen (UNFCCC) und führte drei flexible Mechanismen ein, die den teilnehmenden Ländern helfen sollten, ihre Emissionsziele kosteneffizient zu erreichen: den Emissionshandel, die Gemeinsame Umsetzung (Joint Implementation – JI) und den Mechanismus für umweltverträgliche Entwicklung (Clean Development Mechanism – CDM) (Freestone & Streck, 2005).

Der Emissionshandel im Rahmen des Kyoto-Protokolls erlaubte es Industrieländern, die ihre Emissionsziele übererfüllten, überschüssige Emissionsrechte an Länder zu verkaufen, die Schwierigkeiten hatten, ihre Ziele zu erreichen. Dies schuf einen internationalen Markt für Emissionsrechte, der darauf abzielte, die globalen Reduktionskosten zu senken, indem

Emissionen dort reduziert wurden, wo es am günstigsten war (Raufer & Iyer, 2012). Der Mechanismus der Gemeinsamen Umsetzung (JI) ermöglichte es Industrieländern, Emissionsminderungen aus Projekten in anderen Industrieländern zu generieren und diese auf ihre eigenen Emissionsziele anzurechnen. Projekte könnten beispielsweise die Modernisierung von Kraftwerken oder die Verbesserung der Energieeffizienz umfassen.

Der Mechanismus für umweltverträgliche Entwicklung (CDM) war besonders innovativ, da er Industrieländern erlaubte, Emissionsminderungen aus Projekten in Entwicklungsländern zu generieren. Diese Projekte, wie der Bau erneuerbarer Energieanlagen oder die Vermeidung von Methanemissionen, sollten nicht nur zur Emissionsreduktion beitragen, sondern auch eine nachhaltige Entwicklung in den Gastländern fördern (Freestone & Streck, 2005). Die durch CDM-Projekte generierten Zertifikate, sogenannte Certified Emission Reductions (CERs), konnten von Industrieländern zur Erfüllung ihrer Kyoto-Ziele genutzt werden.

Trotz des bahnbrechenden Charakters des Kyoto-Protokolls und seiner Mechanismen gab es auch erhebliche Herausforderungen und Kritikpunkte. Die Komplexität der Regeln, die Schwierigkeiten bei der Gewährleistung der Additionality (dass die Reduktionen nur durch das Projekt zustande kamen und nicht ohnehin erfolgt wären) und die geografische Ungleichverteilung der Projekte führten zu Debatten über die tatsächliche Wirksamkeit und Integrität dieser Mechanismen (Skopek, 2010). Dennoch legten die Kyoto-Mechanismen einen wichtigen Grundstein für die Entwicklung zukünftiger Emissionshandelssysteme und bewiesen die Machbarkeit marktwirtschaftlicher Ansätze auf internationaler Ebene (Ribeiro et al., 2024).

1.3 Die Entstehung des EU-Emissionshandelssystems (EU ETS) Als Reaktion auf die Verpflichtungen aus dem Kyoto-Protokoll und dem Bestreben, eine führende Rolle im globalen Klimaschutz einzunehmen, etablierte die Europäische Union 2005 das EU-Emissionshandelssystem (EU ETS). Es war das weltweit erste und größte internationale

System zur Begrenzung und zum Handel von Treibhausgasemissionen und deckt heute etwa 40 % der gesamten Treibhausgasemissionen der EU ab (climate.ec.europa.eu, 2025)(Klimko & Hasprová, 2025).

Das EU ETS wurde in mehreren Phasen implementiert, wobei jede Phase auf den Erfahrungen der vorherigen aufbaute und wichtige Reformen mit sich brachte:

- **Phase 1 (2005-2007): Die Lernphase.** Diese Pilotphase diente dazu, die Infrastruktur und die Funktionsweise des Systems zu testen. Die Emissionsrechte (EUAs) wurden hauptsächlich kostenlos zugeteilt (Grandfathering), und die Obergrenzen wurden von den einzelnen Mitgliedstaaten festgelegt. Ein wesentliches Problem dieser Phase war eine Überallokation von Emissionsrechten, die zu einem Preisverfall führte und die Reduktionsanreize schwächte (Betz et al., 2022).
- **Phase 2 (2008-2012): Anpassung an Kyoto.** Diese Phase fiel mit der ersten Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls zusammen. Obwohl einige Verbesserungen vorgenommen wurden, wie die Harmonisierung der Zuteilungsregeln, blieb die Überallokation ein Problem, verstärkt durch die Finanzkrise von 2008, die die Emissionen reduzierte und das Überangebot an Rechten weiter erhöhte (Betz et al., 2022).
- **Phase 3 (2013-2020): Zentralisierung und Harmonisierung.** Diese Phase brachte umfassende Reformen mit sich. Es wurde eine EU-weite Obergrenze eingeführt, die jährlich linear sank. Die kostenlose Zuteilung wurde schrittweise durch Auktionen ersetzt, insbesondere für den Stromsektor. Der Umfang des Systems wurde auf weitere Gase und Sektoren (z. B. Luftverkehr) ausgeweitet (climate.ec.europa.eu, 2025). Trotz dieser Reformen blieb der EUA-Preis aufgrund des kumulierten Überschusses an Rechten niedrig, was die Notwendigkeit weiterer Maßnahmen zur Marktstabilisierung verdeutlichte.
- **Phase 4 (2021-2030): Erhöhte Ambitionen und Marktstabilitätsreserve.** Um die Wirksamkeit des EU ETS zu stärken und die EU-Klimaziele für 2030 zu erreichen, wurden in Phase 4 weitere bedeutende Änderungen vorgenommen. Die lin-

eare Reduktionsrate der Obergrenze wurde erhöht, und die Marktstabilitätsreserve (MSR) wurde gestärkt. Die MSR passt die Menge der zu versteigernden Zertifikate automatisch an das Angebots- und Nachfragegleichgewicht an, indem sie überschüssige Zertifikate zurückhält oder bei Bedarf freigibt (climate.ec.europa.eu, 2025)(Klimko & Hasprová, 2025). Dies sollte die Preissignale verbessern und das System widerstandsfähiger gegenüber externen Schocks machen.

Die Entwicklung des EU ETS zeigt eine kontinuierliche Anpassung und Verbesserung, um die Herausforderungen eines komplexen Marktinstruments zu bewältigen und seine Rolle als zentrales Instrument der EU-Klimapolitik zu festigen (Klimko & Hasprová, 2025). Die Erfahrungen des EU ETS haben auch andere Jurisdiktionen beeinflusst, die eigene Emissionshandelssysteme entwickeln oder bestehende Systeme reformieren (Betz et al., 2022)(worldbank.org, 2025).

2. Theoretische Grundlagen der Umweltökonomie

Die theoretischen Fundamente, auf denen Emissionshandelssysteme und andere marktwirtschaftliche Instrumente aufbauen, sind tief in der Umweltökonomie verwurzelt. Diese Disziplin untersucht die Wechselwirkungen zwischen Wirtschaft und Umwelt und bietet Erklärungsansätze für Umweltprobleme sowie Lösungsstrategien (Abrha, 2025).

2.1 Marktversagen und externe Effekte Ein zentrales Konzept in der Umweltökonomie ist das Marktversagen, das auftritt, wenn freie Märkte keine effiziente Allokation von Ressourcen erreichen. Umweltverschmutzung ist ein klassisches Beispiel für ein Marktversagen, das durch negative externe Effekte verursacht wird (Abrha, 2025). Eine externe Wirkung liegt vor, wenn die Produktion oder der Konsum eines Gutes die Wohlfahrt Dritter beeinflusst, ohne dass dies über den Marktpreis kompensiert wird. Im Falle der CO₂-Emissionen verursachen Unternehmen oder Einzelpersonen, die fossile Brennstoffe verbrennen, Kosten in Form von Klimaschäden (z. B. Extremwetterereignisse, Meeresspiegel-

lanstieg), die nicht in den Produktionskosten oder den Preisen der Produkte enthalten sind.

Dies führt dazu, dass die gesellschaftlichen Kosten (private Kosten plus externe Kosten) die privaten Kosten übersteigen. Ohne Eingriffe des Staates oder andere Mechanismen wird zu viel des umweltschädlichen Gutes produziert oder konsumiert, da die Verursacher die vollen Kosten ihrer Handlungen nicht tragen (Abrha, 2025). Der Marktpreis spiegelt nicht die wahren sozialen Kosten wider, was zu einer ineffizienten und umweltschädlichen Allokation von Ressourcen führt. Die Internalisierung dieser externen Kosten ist das Hauptziel von Umweltpolitiken wie dem Emissionshandel oder CO2-Steuern.

2.2 Instrumente der Umweltpolitik Um Marktversagen zu korrigieren und Umweltziele zu erreichen, stehen der Politik verschiedene Instrumente zur Verfügung, die grob in ordnungsrechtliche (Command and Control) und marktwirtschaftliche Ansätze unterteilt werden können.

- **Ordnungsrechtliche Instrumente (Command and Control):** Diese Ansätze basieren auf Vorschriften und Standards, die von staatlichen Behörden erlassen und durchgesetzt werden. Beispiele hierfür sind Emissionsgrenzwerte für bestimmte Anlagen, technische Vorschriften für Produkte (z. B. Effizienzstandards für Fahrzeuge) oder Verbote bestimmter umweltschädlicher Substanzen. Vorteile dieser Instrumente liegen in ihrer direkten Kontrollmöglichkeit und der relativen Einfachheit der Durchsetzung, insbesondere wenn die Überwachung einfach ist. Nachteile sind jedoch oft die Inflexibilität und die potenziell höheren Gesamtkosten für die Gesellschaft. Da alle Verursacher die gleichen Standards erfüllen müssen, wird keine Rücksicht auf unterschiedliche Vermeidungskosten genommen. Dies kann dazu führen, dass Unternehmen mit hohen Vermeidungskosten unverhältnismäßig stark belastet werden, während Unternehmen mit niedrigen Vermeidungskosten keine Anreize haben, über den Standard hinauszugehen (Raufer & Iyer, 2012).

- **Marktwirtschaftliche Instrumente:** Diese Ansätze nutzen Preissignale und Marktmechanismen, um Anreize für umweltfreundliches Verhalten zu schaffen. Sie gelten als kosteneffizienter, da sie den Verursachern die Flexibilität geben, die kostengünstigsten Reduktionsmaßnahmen zu wählen.
- **Pigou-Steuern (Umweltsteuern):** Eine Pigou-Steuer, wie eine CO₂-Steuer, setzt einen Preis pro Einheit der Emission fest (Edenhofer et al., 2019). Unternehmen müssen für jede emittierte Tonne CO₂ einen bestimmten Betrag zahlen. Dies schafft einen direkten Anreiz, Emissionen zu reduzieren, bis die Grenzkosten der Vermeidung den Steuersatz erreichen. Vorteile sind die Generierung von Einnahmen für den Staat, die für umweltfreundliche Investitionen oder zur Entlastung anderer Steuern verwendet werden können, und die relative Transparenz. Herausforderungen bestehen darin, den “optimalen” Steuersatz zu bestimmen und politische Widerstände gegen neue Steuern zu überwinden (Edenhofer et al., 2019).
- **Emissionshandelssysteme (Cap-and-Trade):** Im Gegensatz zu Steuern, die den Preis festlegen und die Emissionsmenge dem Markt überlassen, legen Emissionshandelssysteme eine Obergrenze (Cap) für die Gesamtemissionen fest und lassen den Markt den Preis bestimmen (Raufer & Iyer, 2012). Die Gesamtmenge der zulässigen Emissionen wird in handelbare Emissionsrechte aufgeteilt. Unternehmen, die ihre Emissionen unter ihre zugeteilten Rechte senken können, können die überschüssigen Rechte an Unternehmen verkaufen, deren Reduktionskosten höher sind. Dies führt dazu, dass Emissionen dort reduziert werden, wo es am kostengünstigsten ist, wodurch die Gesamtkosten der Emissionsminderung für die Volkswirtschaft minimiert werden (Ellerman & Harrison, 2003). Darüber hinaus fördern EHS technologische Innovationen, da Unternehmen kontinuierlich nach Wegen suchen, ihre Emissionen noch kostengünstiger zu reduzieren, um von den Verkaufserlösen überschüssiger Zertifikate zu profitieren oder Kosten zu sparen (Chen et al., 2024).

- **Subventionen:** Subventionen können ebenfalls als marktwirtschaftliches Instrument eingesetzt werden, um umweltfreundliche Technologien oder Praktiken zu fördern (z. B. Subventionen für erneuerbare Energien). Sie können Anreize für Investitionen schaffen, können aber auch zu Marktverzerrungen führen und sind oft mit hohen Kosten für den Steuerzahler verbunden.

2.3 Effizienz und Gerechtigkeit im Emissionshandel Die Attraktivität von Emissionshandelssystemen liegt maßgeblich in ihren potenziellen Effizienzvorteilen.

- **Kosteneffizienz:** EHS fördern die statische Kosteneffizienz, indem sie sicherstellen, dass die gesamte Emissionsminderung zu den niedrigstmöglichen Kosten für die Volkswirtschaft erreicht wird. Unternehmen mit niedrigen Grenzkosten der Emissionsminderung reduzieren ihre Emissionen stärker und verkaufen überschüssige Zertifikate, während Unternehmen mit hohen Grenzkosten Zertifikate kaufen, anstatt teure Reduktionsmaßnahmen zu ergreifen. Der Handel stellt sicher, dass der Preis der Emissionsrechte in allen Unternehmen gleich ist und den Grenzkosten der Emissionsminderung entspricht (Raufer & Iyer, 2012).
- **Dynamische Effizienz und Innovation:** EHS bieten auch Anreize für dynamische Effizienz, indem sie Unternehmen dazu motivieren, in Forschung und Entwicklung (F&E) für kohlenstoffarme Technologien zu investieren (Chen et al., 2024). Da jede Reduktion von Emissionen den Wert der Zertifikate erhöht, die verkauft werden können, oder die Kosten für den Kauf von Zertifikaten senkt, haben Unternehmen einen kontinuierlichen Anreiz, ihre Emissionen über die Zeit zu reduzieren. Dies fördert langfristig die technologische Innovation und den Übergang zu einer kohlenstoffarmen Wirtschaft (Chen et al., 2024).
- **Verteilungswirkungen (Gerechtigkeit):** Neben der Effizienz sind auch Gerechtigkeitsfragen von zentraler Bedeutung. EHS können unterschiedliche Verteilungswirkungen haben, je nachdem, wie die Emissionsrechte zugeteilt werden

(kostenlos vs. Auktionierung) und wie die Einnahmen aus Auktionen verwendet werden. Kostenlose Zuteilung kann zu unerwarteten Gewinnen (Windfall Profits) für Unternehmen führen, insbesondere wenn sie die Kosten der Emissionsrechte an die Verbraucher weitergeben können, ohne sie selbst bezahlt zu haben. Auktionen hingegen generieren Einnahmen, die für Umverteilungsmaßnahmen, Investitionen in Klimaschutz oder zur Entlastung einkommensschwacher Haushalte genutzt werden könnten, um die regressiven Effekte von höheren Preisen zu mildern (Edenhofer et al., 2019).

Ein weiteres Gerechtigkeitsproblem ist das sogenannte **Carbon Leakage** (Kohlenstoffleakage). Dies tritt auf, wenn Unternehmen ihre Produktion oder Investitionen in Länder mit weniger strengen Klimapolitiken verlagern, um die Kosten der Emissionsrechte zu vermeiden (Naegele & Zaklan, 2017). Dies führt nicht nur zu einem Verlust von Arbeitsplätzen und Wirtschaftskraft im regulierten Land, sondern kann auch die globalen Emissionen erhöhen, wenn die Produktion in weniger effizienten Anlagen erfolgt. Um Carbon Leakage zu begegnen, wurden Mechanismen wie die kostenlose Zuteilung für energieintensive und handelsintensive Sektoren oder der Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) in der EU eingeführt (Ma & Xu, 2024).

3. CO₂-Preismechanismen und Klimaschutz

CO₂-Preismechanismen sind essenziell, um die externen Kosten von Treibhausgasemissionen zu internalisieren und Anreize für Reduktionen zu schaffen. Sie bilden einen Kernbestandteil moderner Klimapolitik und manifestieren sich in verschiedenen Formen, von Emissionshandelssystemen bis hin zu CO₂-Steuern (Digitemie & Ekemezie, 2024)(Vadhava & Khanna, 2025).

3.1 Überblick über verschiedene CO₂-Preismechanismen Die beiden dominierenden Ansätze zur Bepreisung von CO₂-Emissionen sind Emissionshandelssysteme und CO₂-Steuern, ergänzt durch hybride Modelle.

- **Emissionshandelssysteme (ETS):** Wie bereits erwähnt, legen ETS eine absolute Obergrenze (Cap) für die Gesamtemissionen fest und verteilen handelbare Emissionsscheine. Der Markt bestimmt den Preis pro Tonne CO₂. Weltweit gibt es eine wachsende Zahl von ETS, die jeweils an lokale Gegebenheiten angepasst sind (worldbank.org, 2025). Beispiele hierfür sind neben dem EU ETS Systeme in Kalifornien (USA), Quebec (Kanada), Südkorea, Neuseeland und seit 2021 auch ein nationales ETS in China, das das größte System weltweit ist (Digitemie & Ekemezie, 2024)(worldbank.org, 2025). Obwohl die grundlegenden Prinzipien ähnlich sind, variieren die Systeme in Bezug auf Umfang, Sektoren, Allokationsmethoden und Stabilitätsmechanismen (Betz et al., 2022).
- **CO₂-Steuern:** Im Gegensatz zu ETS legen CO₂-Steuern einen festen Preis pro Tonne CO₂ fest, während die resultierende Emissionsmenge vom Markt bestimmt wird (Edenhofer et al., 2019). Länder wie Schweden, die Schweiz und Kanada haben CO₂-Steuern erfolgreich implementiert. Der Hauptvorteil von CO₂-Steuern liegt in ihrer Preissicherheit, die Unternehmen Planungssicherheit für Investitionen gibt. Zudem sind sie in der Regel einfacher zu implementieren und zu verwalten als komplexe Handelssysteme. Die Einnahmen können direkt für fiskalische Zwecke oder zur Finanzierung grüner Übergänge verwendet werden (Edenhofer et al., 2019). Der Hauptnachteil ist die Unsicherheit über die erzielte Emissionsreduktion, da diese von der Preiselastizität der Nachfrage abhängt.
- **Hybride Systeme:** Einige Jurisdiktionen kombinieren Elemente von ETS und CO₂-Steuern, um die Vorteile beider Ansätze zu nutzen und Nachteile zu minimieren. Beispiele hierfür sind Preisobergrenzen (Price Caps) oder Preisuntergrenzen (Price Floors), die in ETS integriert werden können. Eine Preisobergrenze (Safety Valve)

begrenzt den maximalen Preis für Emissionsrechte, um übermäßige Kosten für Unternehmen zu vermeiden, während eine Preisuntergrenze einen Mindestpreis garantiert, um Investitionssicherheit zu gewährleisten und einen zu starken Preisverfall zu verhindern (Kersting et al., 2014). Solche Mechanismen, wie die Marktstabilitätsreserve (MSR) im EU ETS, die das Angebot an Zertifikaten anpasst, zeigen den Trend zu ausgefeilteren Designelementen zur Optimierung der Systeme (Klimko & Hasprová, 2025).

3.2 Design-Elemente von Emissionshandelssystemen Der Erfolg eines Emissionshandelssystems hängt maßgeblich von seinem Design ab. Verschiedene Elemente müssen sorgfältig konzipiert werden, um Effizienz, Gerechtigkeit und politische Akzeptanz zu gewährleisten.

- **Cap-Setting (Festlegung der Obergrenze):** Die Festlegung der Gesamtobergrenze für Emissionen ist der kritischste Designparameter, da sie die Ambition des Systems direkt bestimmt (Raufer & Iyer, 2012). Eine zu hohe Obergrenze führt zu einem Überangebot an Zertifikaten und niedrigen Preisen, wodurch die Anreize zur Emissionsreduktion geschwächt werden. Eine zu niedrige Obergrenze kann zu extrem hohen Preisen und unerwünschten wirtschaftlichen Auswirkungen führen. Die Obergrenze muss jährlich linear reduziert werden, um langfristige Reduktionsziele zu erreichen, wie es im EU ETS der Fall ist (climate.ec.europa.eu, 2025).
- **Allokationsmethoden:** Die Art und Weise, wie Emissionsrechte ursprünglich an die Unternehmen verteilt werden, hat erhebliche Auswirkungen auf die Verteilungswirkungen und die Akzeptanz des Systems.
- **Grandfathering (kostenlose Zuteilung):** Hierbei erhalten Unternehmen Emissionsrechte basierend auf ihren historischen Emissionen. Dies kann die Akzeptanz bei den betroffenen Industrien erhöhen, da es die anfänglichen Kosten senkt. Allerdings kann es zu “Windfall Profits” führen, wenn Unternehmen die Kosten der Emissionen an ihre

Kunden weitergeben, ohne selbst für die Zertifikate bezahlt zu haben (Raufer & Iyer, 2012).

- **Auktionierung:** Emissionsrechte werden versteigert, und die Einnahmen fließen an den Staat. Dies gilt als ökonomisch effizientester Weg, da es die Verteilungswirkungen transparenter macht und die Möglichkeit für Windfall Profits reduziert. Die Einnahmen können für Klimaschutzmaßnahmen, Steuersenkungen oder zur Kompensation sozialer Härten verwendet werden (Edenhofer et al., 2019). Das EU ETS hat den Anteil der Auktionierung über die Phasen hinweg schrittweise erhöht (climate.ec.europa.eu, 2025).
- **Scope (Umfang):** Der Umfang des Systems definiert, welche Sektoren, Gase und geografischen Gebiete abgedeckt sind. Das EU ETS deckt zunächst nur CO₂-Emissionen aus großen Industrieanlagen und dem Stromsektor ab, wurde aber später auf weitere Gase und den Luftverkehr ausgeweitet (climate.ec.europa.eu, 2025). Eine Ausweitung auf Sektoren wie Gebäude und Verkehr ist in Planung, um die Klimaziele zu erreichen. Ein breiterer Umfang erhöht in der Regel die Kosteneffizienz, da mehr Reduktionsoptionen zur Verfügung stehen.
- **Marktstabilität:** Die Preisvolatilität von Emissionsrechten kann Investitionsentscheidungen erschweren und die Wirksamkeit des Systems beeinträchtigen. Mechanismen zur Marktstabilisierung, wie die Marktstabilitätsreserve (MSR) im EU ETS, sind entscheidend (Klimko & Hasprová, 2025). Die MSR passt das Angebot an Zertifikaten dynamisch an die Marktlage an, indem sie überschüssige Zertifikate in Zeiten niedriger Nachfrage entzieht und in Zeiten hoher Nachfrage freigibt.
- **Verknüpfung von Systemen (Linkages):** Die Verknüpfung verschiedener Emissionshandelssysteme (z. B. zwischen EU ETS und dem kalifornischen System) kann die Liquidität der Märkte erhöhen, die Kosteneffizienz verbessern und die globale Zusammenarbeit im Klimaschutz fördern (Betz et al., 2022). Allerdings erfordert die

Verknüpfung eine sorgfältige Harmonisierung der Designelemente und eine gemeinsame Ambitionsstufe, um Verzerrungen zu vermeiden.

3.3 Die Rolle von CO2-Preisen im Kontext umfassender Klimapolitik CO2-Preismechanismen sind selten die einzige Säule der Klimapolitik. Vielmehr sind sie oft Teil eines umfassenden Politikmixes, der ordnungsrechtliche Maßnahmen, Subventionen, Forschungs- und Entwicklungsprogramme sowie internationale Kooperationen umfasst (Kersting et al., 2014).

Die Wechselwirkung zwischen CO2-Preisen und anderen Politiken ist komplex. Beispielsweise können Subventionen für erneuerbare Energien oder Energieeffizienzmaßnahmen die Nachfrage nach Emissionsrechten reduzieren und damit den CO2-Preis senken. Dies kann die Anreize des Emissionshandelssystems schwächen, kann aber auch notwendig sein, um Infrastrukturinvestitionen zu fördern oder Marktbarrieren zu überwinden, die der CO2-Preis allein nicht adressieren kann. Ein gut konzipierter Politikmix muss die Komplementarität und potenziellen Konflikte der verschiedenen Instrumente berücksichtigen, um Synergien zu maximieren und Ineffizienzen zu vermeiden (Kersting et al., 2014).

Internationale Kooperationen spielen eine entscheidende Rolle, insbesondere bei der Vermeidung von Carbon Leakage. Der Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) der EU ist ein Beispiel für ein solches Instrument, das darauf abzielt, die Kohlenstoffkosten von Importen an die im EU ETS geltenden Preise anzupassen (Ma & Xu, 2024). Dies soll die Wettbewerbsfähigkeit von EU-Unternehmen wahren, Carbon Leakage verhindern und gleichzeitig Drittländer dazu anregen, ihre eigenen Klimaschutzmaßnahmen zu verstärken.

4. Empirische Studien zur Wirksamkeit

Die empirische Forschung hat sich intensiv mit der Frage befasst, inwieweit Emissionshandelssysteme und CO2-Preismechanismen ihre angestrebten Ziele – insbesondere die Re-

duktion von Treibhausgasemissionen – tatsächlich erreichen und welche weiteren Auswirkungen sie auf Wirtschaft und Innovation haben.

4.1 Wirksamkeit des EU ETS Das EU-Emissionshandelssystem ist aufgrund seiner Größe und Dauer das am besten untersuchte ETS weltweit. Studien zur Wirksamkeit des EU ETS zeigen übereinstimmend, dass es zu einer signifikanten Reduktion der Treibhausgasemissionen beigetragen hat (Klimko & Hasprová, 2025)(climate.ec.europa.eu, 2025). Klimko und Hasprová (2025) analysierten beispielsweise die Auswirkungen des EU ETS zwischen 2005 und 2022 und fanden heraus, dass das System maßgeblich zur Senkung der Emissionen im regulierten Sektor beigetragen hat (Klimko & Hasprová, 2025). Die Europäische Kommission und die Europäische Umweltagentur berichten ebenfalls über kontinuierliche Emissionsrückgänge in den vom ETS abgedeckten Sektoren (climate.ec.europa.eu, 2025)(umweltbundesamt.de, 2025). Es ist jedoch eine Herausforderung, den reinen ETS-Effekt von anderen Faktoren wie dem wirtschaftlichen Abschwung (z. B. während der Finanzkrise 2008 oder der COVID-19-Pandemie (Olhoff et al., 2022)), dem Strukturwandel der Wirtschaft oder anderen Klimaschutzmaßnahmen zu isolieren (Klimko & Hasprová, 2025). Methodisch anspruchsvolle Studien verwenden oft ökonometrische Modelle, um diese Kofaktoren zu kontrollieren und den kausalen Einfluss des ETS zu schätzen.

Hinsichtlich der wirtschaftlichen Auswirkungen des EU ETS gibt es gemischte Befunde. Naegele und Zaklan (2017) untersuchten die Frage des Carbon Leakage in der europäischen Fertigungsindustrie und fanden nur begrenzte empirische Belege für eine signifikante Verlagerung von Emissionen oder Produktionskapazitäten aufgrund des ETS, insbesondere in Sektoren, die kostenlose Zuteilungen erhielten (Naegele & Zaklan, 2017). Andere Studien, wie die von Madaleno, Robaina et al. (2024) für Portugal, zeigen, dass das EU ETS zwar Kosten für Unternehmen verursacht, aber die Auswirkungen auf die Unternehmensleistung je nach Sektor und Anpassungsfähigkeit variieren können (Madaleno et al., 2024). Insgesamt scheint der negative Einfluss auf die Wettbewerbsfähigkeit weniger

gravierend zu sein als oft befürchtet, insbesondere durch die Verwendung von kostenlosen Zuteilungen und den geplanten CBAM (Ma & Xu, 2024).

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Förderung technologischer Innovationen. Chen, Brockway et al. (2024) untersuchten den Einfluss von Emissionshandelssystemen auf technologische Innovationen und fanden positive Korrelationen, die darauf hindeuten, dass der CO2-Preis Anreize für die Entwicklung und Einführung kohlenstoffärmer Technologien schafft (Chen et al., 2024). Unternehmen sind motiviert, in F&E zu investieren, um Emissionen kostengünstiger zu vermeiden und dadurch ihre Belastung durch den CO2-Preis zu reduzieren oder sogar Gewinne aus dem Verkauf überschüssiger Zertifikate zu erzielen. Dies ist ein entscheidender Mechanismus, um den Übergang zu einer nachhaltigeren Wirtschaft zu beschleunigen.

4.2 Studien zu anderen Emissionshandelssystemen Neben dem EU ETS liefern auch Studien zu anderen Emissionshandelssystemen wichtige Erkenntnisse über deren Wirksamkeit und Design.

- **USA (z. B. RGGI, Kalifornien):** Das Regional Greenhouse Gas Initiative (RGGI) in den nordöstlichen und mittelatlantischen USA, das den Stromsektor abdeckt, hat ebenfalls nachweislich zu Emissionsreduktionen geführt (rggi.org, 2025). Das kalifornische Cap-and-Trade-System, das eine breitere Abdeckung von Sektoren und Gasen aufweist, wird ebenfalls als wirksam bei der Reduzierung von Emissionen angesehen, während es gleichzeitig Wirtschaftswachstum ermöglicht (mpra.ub.uni-muenchen.de, 2025). Ellerman und Harrison (2003) untersuchten frühe Erfahrungen mit Emissionshandel in den USA, insbesondere im SO2-Programm, und hoben die Kosteneffizienz und Flexibilität des Ansatzes hervor, was die Grundlage für spätere CO2-Handelssysteme legte (Ellerman & Harrison, 2003).
- **China:** China hat 2021 sein nationales Emissionshandelssystem eingeführt, das den größten Kohlenstoffmarkt der Welt darstellt und zunächst den Stromsektor abdeckt

(worldbank.org, 2025). Frühe Analysen zeigen, dass das System das Potenzial hat, erhebliche Emissionsreduktionen zu erzielen, allerdings stehen die chinesischen Behörden noch vor Herausforderungen bei der Datenqualität, der Durchsetzung und der Ausweitung des Umfangs (ideas.repec.org, 2025). Chen (2024) analysierte den Einfluss des Kohlenstoffmarktes auf die Kohlenstoffemissionen von Unternehmen und stellte fest, dass die Einführung des Marktes Anreize für Unternehmen schafft, ihre Emissionsintensität zu reduzieren (Chen, 2024).

- **Andere Systeme:** Systeme in Südkorea, Neuseeland und der Schweiz zeigen ebenfalls unterschiedliche Grade der Wirksamkeit, abhängig von ihrem Design, der Ambition der Obergrenze und der Marktstabilität (Betz et al., 2022). Die Erfahrungen aus diesen Systemen tragen dazu bei, Best Practices für das Design und die Implementierung von Emissionshandelssystemen weltweit zu identifizieren.

4.3 Herausforderungen bei der empirischen Bewertung Die empirische Bewertung der Wirksamkeit von Emissionshandelssystemen ist mit erheblichen methodischen Herausforderungen verbunden:

- **Das Counterfactual-Problem:** Die größte Schwierigkeit besteht darin, zu bestimmen, was ohne das Emissionshandelssystem geschehen wäre (das sogenannte Counterfactual). Da es keine perfekte Kontrollgruppe gibt, müssen Forscher komplexe ökonometrische Methoden (z. B. Difference-in-Differences, Synthetic Control Methods) anwenden, um den kausalen Effekt des ETS zu isolieren (Klimko & Hasprová, 2025).
- **Attribution:** Es ist oft schwierig, die beobachteten Emissionsreduktionen eindeutig dem ETS zuzuschreiben, da viele andere Faktoren (z. B. Wirtschaftswachstum, technologische Fortschritte, andere Klimapolitiken, Energiepreise) gleichzeitig wirken (Klimko & Hasprová, 2025). Ein Rückgang der Emissionen könnte beispielsweise auch

auf eine Rezession oder eine stärkere Nutzung erneuerbarer Energien aufgrund von Subventionen zurückzuführen sein.

- **Datenbeschränkungen:** Die Verfügbarkeit und Qualität von Emissionsdaten, Wirtschaftsdaten und Daten zu technologischen Innovationen kann die Analyse erschweren, insbesondere in Entwicklungsländern oder bei neueren Systemen.
- **Dynamische Effekte:** Die langfristigen dynamischen Effekte von ETS, wie die Förderung von Innovationen, sind oft schwer zu messen und erfordern längere Beobachtungszeiträume. Trotz dieser Herausforderungen liefern die kumulierten empirischen Erkenntnisse ein starkes Argument für die Wirksamkeit von Emissionshandelssystemen als Instrument zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen (Digitemie & Ekemezie, 2024).

5. Kritische Perspektiven und Herausforderungen

Trotz der erwiesenen Wirksamkeit und der theoretischen Vorteile von Emissionshandelssystemen sind diese Instrumente Gegenstand kontinuierlicher Debatten und stehen vor mehreren Herausforderungen, die ihre Effektivität, Gerechtigkeit und politische Akzeptanz beeinflussen können.

5.1 Carbon Leakage und Wettbewerbsfähigkeit Das Risiko der Kohlenstoffleckage (Carbon Leakage) bleibt eine zentrale Besorgnis im Design von Emissionshandelssystemen (Naegele & Zaklan, 2017). Carbon Leakage tritt auf, wenn Unternehmen, die hohen Kohlenstoffkosten in einem regulierten Gebiet ausgesetzt sind, ihre Produktion in Regionen mit weniger strengen Klimapolitiken verlagern. Dies kann nicht nur zu einem Verlust von Arbeitsplätzen und wirtschaftlicher Aktivität im regulierten Land führen, sondern auch die globalen Emissionen erhöhen, wenn die Produktion in weniger effizienten Anlagen erfolgt oder der Emissionshandelspreis untergraben wird (Naegele & Zaklan, 2017).

Empirische Studien, wie die von Naegele und Zaklan (2017) zum EU ETS, haben zwar nur begrenzte Belege für großflächiges Carbon Leakage gefunden, was teilweise auf die kostenlose Zuteilung von Emissionsrechten an gefährdete Sektoren zurückzuführen ist (Naegele & Zaklan, 2017). Dennoch bleibt die Wahrnehmung eines solchen Risikos ein wichtiger Faktor in der politischen Debatte und kann die Ambition von Emissionsreduktionszielen beeinflussen. Um Carbon Leakage entgegenzuwirken und die globale Wettbewerbsfähigkeit zu sichern, hat die Europäische Union den Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) vorgeschlagen und eingeführt (Ma & Xu, 2024). Der CBAM zielt darauf ab, einen fairen Kohlenstoffpreis auf Importe von bestimmten energieintensiven Gütern zu erheben, um sicherzustellen, dass die Kohlenstoffkosten von importierten Produkten den im EU ETS geltenden Preisen entsprechen. Dies soll gleiche Wettbewerbsbedingungen schaffen und Drittländer dazu anregen, eigene Klimaschutzmaßnahmen zu ergreifen.

5.2 Preisvolatilität und Marktmanipulation Die Preise für Emissionsrechte in einem ETS können erheblichen Schwankungen unterliegen, beeinflusst durch Faktoren wie Wirtschaftswachstum, Energiepreise, Änderungen in der Politik und Wetterereignisse (Betz et al., 2022). Eine hohe Preisvolatilität kann für Unternehmen Unsicherheit schaffen, Investitionsentscheidungen erschweren und die langfristige Planung für den Übergang zu kohlenstoffarmen Technologien behindern. Ein zu niedriger Preis schwächt die Anreize zur Emissionsreduktion, während extrem hohe Preise die Wettbewerbsfähigkeit gefährden und politische Widerstände hervorrufen können.

Das EU ETS hat in seiner Geschichte Perioden mit sehr niedrigen Preisen erlebt, was die Einführung von Marktstabilitätsmechanismen wie der Marktstabilitätsreserve (MSR) notwendig machte (Klimko & Hasprová, 2025). Die MSR passt das Angebot an Emissionsrechten dynamisch an, um übermäßige Preisbewegungen zu dämpfen und ein Mindestpreisniveau zu unterstützen. Darüber hinaus besteht die theoretische Möglichkeit der Marktma-

nipulation, obwohl robuste Regulierungsrahmen und Überwachungssysteme darauf abzielen, solche Praktiken zu verhindern und die Integrität des Marktes zu gewährleisten.

5.3 Gerechtigkeitsaspekte und soziale Akzeptanz CO2-Preismechanismen können regressiv wirken, da sie die Preise für Energie und Güter erhöhen, was einkommensschwächere Haushalte proportional stärker belasten kann, da diese einen größeren Anteil ihres Einkommens für grundlegende Güter ausgeben (Edenhofer et al., 2019). Dies kann zu sozialer Ungleichheit führen und die öffentliche Akzeptanz von Klimaschutzmaßnahmen untergraben, wie die “Gelbwesten”-Proteste in Frankreich gegen eine erhöhte Kraftstoffsteuer gezeigt haben.

Um diese Gerechtigkeitsbedenken zu adressieren, sind begleitende Maßnahmen entscheidend. Die Einnahmen aus der Versteigerung von Emissionsrechten können zur Kompensation einkommensschwacher Haushalte (z. B. durch “Klimadividenden” oder Steuersenkungen), zur Förderung von Energieeffizienzmaßnahmen in Haushalten oder zur Unterstützung von Strukturwandel in betroffenen Regionen eingesetzt werden (Edenhofer et al., 2019). Eine transparente und gerechte Verwendung der Einnahmen ist entscheidend für die soziale Akzeptanz von CO2-Preisen. Die politische Machbarkeit von CO2-Preisen hängt stark davon ab, wie diese Verteilungswirkungen gemildert und kommuniziert werden (Edenhofer et al., 2019).

5.4 Die Rolle von Offsets und freiwilligen Kohlenstoffmärkten Offsets (Kompensationszertifikate) ermöglichen es Unternehmen oder Einzelpersonen, Emissionen an einem Ort zu kompensieren, indem sie Reduktionsprojekte an einem anderen Ort finanzieren. Diese Projekte können in nicht-ETS-Sektoren oder in Entwicklungsländern stattfinden und generieren Zertifikate, die zur Erfüllung von Emissionszielen genutzt werden können (Skopek, 2010). Während Offsets die Kosteneffizienz erhöhen können, indem sie weitere Reduktionssmöglichkeiten erschließen, sind sie oft mit Herausforderungen verbunden, insbesondere in Bezug auf die Additionality (Nachweis, dass die Reduktion ohne das Offset-Projekt nicht

stattgefunden hätte), Permanenz (langfristige Sicherstellung der Reduktion) und Leckage (Verlagerung von Emissionen) (Skopek, 2010).

Freiwillige Kohlenstoffmärkte existieren parallel zu den regulierten Compliance-Märkten. Auf diesen Märkten kaufen Unternehmen und Einzelpersonen freiwillig Emissionszertifikate, um ihre eigenen “Kohlenstoff-Fußabdrücke” zu kompensieren oder Nachhaltigkeitsziele zu erreichen (Skopek, 2010). Die Qualität und Integrität dieser Märkte ist jedoch oft heterogen, und es gibt Bedenken hinsichtlich der Glaubwürdigkeit einiger Projekte. Die Integration von Offsets in Compliance-Systeme muss sorgfältig gemanagt werden, um die ökologische Integrität des Systems nicht zu untergraben.

5.5 Zukünftige Entwicklungen und Ausweitung von ETS Die zukünftige Entwicklung von Emissionshandelssystemen wird voraussichtlich von einer weiteren Ausweitung des Umfangs und der geografischen Reichweite geprägt sein. Das EU ETS plant bereits eine Ausweitung auf den Seeverkehr sowie auf Emissionen aus Gebäuden und dem Straßenverkehr (ETS2), um die ehrgeizigen Klimaziele der EU zu erreichen (climate.ec.europa.eu, 2025). Diese Ausweitungen bringen neue Herausforderungen mit sich, insbesondere im Hinblick auf die Messung, Berichterstattung und Verifizierung von Emissionen in diesen Sektoren sowie auf die sozialen Auswirkungen der Preissignale auf Haushalte.

Darüber hinaus wird die Verknüpfung bestehender ETS zu größeren regionalen oder sogar globalen Kohlenstoffmärkten als Möglichkeit diskutiert, die Kosteneffizienz zu maximieren und die globale Zusammenarbeit im Klimaschutz zu stärken (Betz et al., 2022). Solche Verknüpfungen erfordern jedoch eine sorgfältige Harmonisierung der Regeln und Ambitionen, um unerwünschte Arbitrage oder Carbon Leakage zwischen den Systemen zu vermeiden. CO₂-Preise, insbesondere durch Emissionshandel, werden voraussichtlich eine zentrale Rolle bei der Erreichung von Netto-Null-Emissionszielen spielen, indem sie kontinuierliche Anreize für Dekarbonisierung und Innovation schaffen (Digitemie & Ekemezie, 2024)(Vadhava & Khanna, 2025). Die ständige Anpassung und Verbesserung der

Designelemente, die Berücksichtigung von Gerechtigkeitsfragen und die Integration in einen kohärenten Politikmix sind entscheidend für ihren langfristigen Erfolg.

6. Vergleich der Designelemente von Emissionshandelssystemen

Um die Vielfalt und die spezifischen Merkmale der verschiedenen Emissionshandelssysteme (EHS) besser zu verstehen, ist ein direkter Vergleich ihrer Designelemente aufschlussreich. Die folgende Tabelle fasst die wichtigsten Merkmale des EU ETS, des kalifornischen Cap-and-Trade-Programms und des nationalen chinesischen EHS zusammen und hebt deren Unterschiede und Gemeinsamkeiten hervor.

Tabelle 1: Vergleich der Designelemente von Emissionshandelssystemen

Designelemente (EU ETS)	EU Emission- shandelssystem	Kalifornisches Cap-and- Trade	Nationales EHS	Impact/Significance
Startjahr	2005	2013	2021	Reifegrad, Lernkurve,
			(national)	Datenverfügbarkeit
Zieltyp	Absolute Obergrenze (Cap)	Absolute Obergrenze (Cap)	Intensitätsziel (pro Einheit)	Steuerung der Emissionsmenge vs. Effizienz
Abgedeckte Sekto ren	Strom, Industrie, Luftfahrt, Seeverkehr (ab 2024), Gebäude/Verkehr (ab 2027)	Strom, Industrie, Transport, Heizung	Strom (geplant: Zement, Stahl, Alu)	Breite der Reduktionsoptionen, Komplexität

Designelement (EU ETS)	EU Emissionshandelssystem	Kalifornisches Cap-and-Trade	Nationales EHS	Impact/Significance
Zuteilung	Auktionen (hauptsächlich), teilweise kostenlos	Auktionen, begrenzte kostenlose Zuteilung	Hauptsächlich kostenlos (historisch)	Verteilungswirkungen, Windfall Profits, Einnahmen
Marktstabilität	MSR	Preisboden, Preisdeckel	in Entwicklung	Stabilitätsmechanismus, Preisvolatilität, Planungssicherheit für Investitionen
Kopplung	Keine (international)	Quebec (Kanada)	Keine (national)	Markttiefe, Kosteneffizienz, globale Kooperation
Herausforderungen	Grenzüberschreitende, soziale Akzeptanz	Politische Unsicherheit, Anpassung	MRV, Datenqualität, Ausweitung	Systemresilienz, politische Machbarkeit

Note: Diese Tabelle bietet eine vereinfachte Darstellung der komplexen Designs. Die genauen Details und Schwellenwerte variieren und unterliegen ständigen Anpassungen. Die "Impact/Significance"-Spalte fasst die primären Auswirkungen des jeweiligen Designelements zusammen.

Methodik

Die vorliegende Masterarbeit verfolgt das Ziel, die Wirksamkeit von Emissionshandelssystemen (ETS) als zentrales Instrument der Klimapolitik zu analysieren. Um dieses Ziel zu erreichen, wird eine umfassende methodische Herangehensweise gewählt, die sowohl

qualitative als auch quantitative Elemente integriert und auf einer vergleichenden Fallstudienanalyse basiert. Die Methodik ist darauf ausgelegt, eine robuste und evidenzbasierte Bewertung der Klimaschutzwirkung von ETS zu ermöglichen und zugleich die zugrunde liegenden Mechanismen und Kontextfaktoren zu beleuchten. Der Fokus liegt dabei auf der systematischen Erfassung und Analyse von Emissionsreduktionen, ökonomischen Auswirkungen und Innovationsanreizen, um ein ganzheitliches Bild der Effektivität zu zeichnung.

2.1 Analyserahmen für die Klimaschutzwirkung von Emissionshandelssystemen

Der Analyserahmen dieser Arbeit basiert auf einem multi-dimensionalen Verständnis der Klimaschutzwirkung von Emissionshandelssystemen. Die primäre Dimension ist die **direkte Emissionsreduktion**, gemessen an der Verringerung der Treibhausgasemissionen in den vom ETS erfassten Sektoren (Klimko & Hasprová, 2025)(Chen et al., 2025). Hierbei wird nicht nur die absolute Reduktion betrachtet, sondern auch die Intensität der Emissionen im Verhältnis zur Wirtschaftsleistung oder Produktion. Ergänzend dazu wird die **ökonomische Effizienz** des Instruments analysiert, welche die Kostenwirksamkeit der Emissionsminderung sowie mögliche Auswirkungen auf Wettbewerbsfähigkeit und Beschäftigung umfasst (Ma & Xu, 2024)(Shen et al., 2024). Ein dritter, entscheidender Aspekt ist die **Förderung technologischer Innovationen**, da ETS Anreize für die Entwicklung und Implementierung kohlenstoffärmer Technologien setzen können, was für langfristige Dekarbonisierungsstrategien von entscheidender Bedeutung ist (Chen et al., 2024)(Chen, 2024).

Der theoretische Unterbau dieses Analyserahmens speist sich aus der Umweltökonomie, insbesondere der Theorie der externen Effekte und marktbasierter Instrumente. Emissionshandelssysteme internalisieren die externen Kosten von Treibhausgasemissionen durch die Bepreisung von CO₂, wodurch Anreize für Emittenten geschaffen werden, ihre Emissionen zu reduzieren, wo dies am kostengünstigsten ist (Digitemie & Ekemezie, 2024)(Raufer & Iyer, 2012)(Edenhofer et al., 2019). Dieser Mechanismus führt zu einer effizienten Allokation von Minderungsanstrengungen über verschiedene Unternehmen und Sektoren hinweg. Der

Analyserahmen berücksichtigt dabei auch potenzielle Nebenwirkungen wie Carbon Leakage, bei dem Unternehmen ihre Produktion in Länder mit weniger strengen Klimaschutzauflagen verlagern könnten, was die globale Emissionsbilanz negativ beeinflussen würde (Naegele & Zaklan, 2017). Die Berücksichtigung dieser Komplexität erfordert eine sorgfältige Abgrenzung der direkten und indirekten Effekte der untersuchten ETS.

Ein weiterer integraler Bestandteil des Analyserahmens ist die Betrachtung der **Gestaltungsmerkmale** der jeweiligen ETS. Diese umfassen Aspekte wie die Festlegung des Caps (Obergrenze), die Methoden der Zuteilung von Zertifikaten (Versteigerung vs. freie Zuteilung), die Volatilität der Zertifikatspreise, Mechanismen zur Marktstabilisierung (z.B. Marktstabilitätsreserve im EU ETS), den Umfang der erfassten Sektoren und Gase sowie die Integration in breitere Klimapolitiken (Betz et al., 2022). Es wird angenommen, dass diese Gestaltungsmerkmale einen signifikanten Einfluss auf die Wirksamkeit und Effizienz eines ETS haben (Vadhava & Khanna, 2025). Ein systematischer Vergleich dieser Merkmale über die Fallstudien hinweg wird ermöglichen, Best Practices zu identifizieren und Empfehlungen für die zukünftige Ausgestaltung von ETS abzuleiten. Die Analyse der Wechselwirkungen zwischen den Gestaltungsmerkmalen und den beobachteten Wirkungen ist zentral, um kausale Zusammenhänge besser zu verstehen und die Übertragbarkeit von Erkenntnissen zu bewerten. Dieser Ansatz erlaubt es, über eine reine Beschreibung der Ergebnisse hinauszugehen und fundierte Erklärungen für beobachtete Unterschiede in der Wirksamkeit zu liefern.

Die Integration dieser verschiedenen Dimensionen und theoretischen Perspektiven in einem kohärenten Analyserahmen ermöglicht eine umfassende Bewertung der Klimaschutzwirkung von Emissionshandelssystemen. Der Rahmen dient als Leitfaden für die Datenerhebung, die Auswahl der Messindikatoren und die Anwendung statistischer Methoden, um die Forschungsfragen der Arbeit präzise zu beantworten. Die Bewertung der Klimaschutzwirkung erfolgt somit nicht isoliert, sondern im Kontext der ökonomischen und technologischen Dynamiken, die durch die ETS ausgelöst oder beeinflusst werden.

Dies ist besonders wichtig, da die reine Betrachtung von Emissionsreduktionen ohne Berücksichtigung der Kosten oder der Innovationsdynamik ein unvollständiges Bild der Gesamtwirkung zeichnen würde.

Abbildung 1: Conceptual Framework for ETS Impact Assessment

Dieses konzeptionelle Modell illustriert die Wirkungszusammenhänge von Emissionshandelssystemen (ETS) auf den Klimaschutz. Es zeigt, wie die Designelemente eines ETS über Preissignale und Anreize direkte Emissionsreduktionen, technologische Innovationen und ökonomische Effizienz beeinflussen, während externe Faktoren und Governance-Aspekte moderierend wirken.

Note: Die Abbildung verdeutlicht, dass die Effektivität eines ETS nicht nur von seinem Design, sondern auch von einem Zusammenspiel aus Marktmechanismen, Innovationsdynamiken, ökonomischen Rahmenbedingungen und der politischen Governance abhängt. Externe Faktoren können diese Beziehungen maßgeblich beeinflussen.

2.2 Auswahlkriterien für Fallstudien

Für eine robuste und vergleichende Analyse wurden Emissionshandelssysteme als Fallstudien ausgewählt, die eine hohe Relevanz für die globale Klimapolitik aufweisen und unterschiedliche Merkmale in Bezug auf Design, Reifegrad und geografische Lage besitzen. Die primären Fallstudien dieser Arbeit sind das **Europäische Emissionshandelssystem (EU ETS)** und das **California Cap-and-Trade Program**. Diese Systeme repräsentieren zwei der größten und am längsten etablierten Emissionshandelssysteme weltweit und bieten somit eine reichhaltige Datenbasis und umfangreiche Erfahrungen in der praktischen Anwendung (Bergfelder, 2008)(climate.ec.europa.eu, 2025).

Die Auswahl des **EU ETS** ist aufgrund seiner Pionierrolle und seines Umfangs von entscheidender Bedeutung. Es wurde 2005 eingeführt und ist das weltweit größte Kohlen-

stoffmarktsystem, das über 10.000 Anlagen in der Energiewirtschaft und energieintensiven Industrie sowie den innereuropäischen Luftverkehr abdeckt (Klimko & Hasprová, 2025)(europarl.europa.eu, 2025)(dehst.de, 2025). Seine lange Betriebsgeschichte ermöglicht die Analyse von Langzeiteffekten und die Bewertung von Anpassungen und Reformen, wie der Einführung der Marktstabilitätsreserve (Stephenson, 2015). Die Komplexität und die wiederholten Reformen des EU ETS bieten wertvolle Einblicke in die Herausforderungen und Erfolgsfaktoren bei der Implementierung eines großen, supranationalen Handelssystems. Die Verfügbarkeit detaillierter Daten und eine umfangreiche wissenschaftliche Literatur zu diesem System erleichtern eine tiefgehende Analyse (Naegele & Zaklan, 2017)(Madaleno et al., 2024).

Das **California Cap-and-Trade Program** wurde 2013 gestartet und ist das zweitgrößte multisektorale Kohlenstoffmarktsystem in Nordamerika. Es deckt etwa 85% der gesamten Treibhausgasemissionen Kaliforniens ab, einschließlich Stromerzeugung, Industrie, Transport und Heizöl (openknowledge.worldbank.org, 2025). Kalifornien ist ein Vorreiter in der Klimapolitik und sein ETS ist bekannt für seine ambitionierten Ziele und seine Verknüpfung mit dem Quebec Cap-and-Trade Program, was eine interessante Dimension der regionalen Zusammenarbeit in der Klimapolitik darstellt. Die Untersuchung des kalifornischen Systems erlaubt einen Vergleich mit dem EU ETS hinsichtlich unterschiedlicher politischer und wirtschaftlicher Kontexte und institutioneller Rahmenbedingungen. Es bietet zudem die Möglichkeit, die Wirksamkeit eines ETS in einer hoch entwickelten Volkswirtschaft mit starkem Fokus auf Innovation und technologischer Führung zu bewerten.

Die Auswahl dieser beiden Systeme erfolgt auf Basis spezifischer Kriterien:

- 1. Reifegrad und Dauerhaftigkeit:** Beide Systeme sind seit ausreichend langer Zeit in Betrieb, um signifikante Effekte beobachten und analysieren zu können. Dies ist entscheidend, um kurzfristige Schwankungen von langfristigen Trends zu unterscheiden (Betz et al., 2022).
- 2. Umfang und Bedeutung:** Sowohl das EU ETS als auch das California ETS decken einen erheblichen Anteil der Emissionen in ihren jeweiligen Jurisdiktionen ab und haben eine weitreichende wirtschaftliche und politische Bedeutung (climate.ec.europa.eu, 2025)(open-

knowledge.worldbank.org, 2025). 3. **Verfügbarkeit von Daten und Literatur:** Für beide Systeme existieren umfangreiche öffentliche Daten und eine breite akademische Forschung, was die empirische Analyse und die Verankerung der Ergebnisse in der bestehenden Literatur ermöglicht (Klimko & Hasprová, 2025)(Erdoğan, 2023). 4. **Unterschiedliche Kontextfaktoren:** Die Systeme operieren in unterschiedlichen politischen, ökonomischen und regulatorischen Umfeldern (supranational vs. subnational, europäischer Binnenmarkt vs. US-Bundesstaat), was eine vergleichende Analyse von Designoptionen und deren Auswirkungen ermöglicht. Dies erlaubt es, die Robustheit der ETS-Wirkungsmechanismen unter verschiedenen Bedingungen zu testen (Bergfelder, 2008). 5. **Anschlussfähigkeit an andere Klimaschutzmaßnahmen:** Beide Systeme sind Teil umfassenderer Klimaschutzstrategien, was die Analyse der Interaktion von ETS mit anderen Instrumenten (z.B. Energieeffizienzstandards, erneuerbare Energien Förderungen) ermöglicht.

Die vergleichende Analyse dieser beiden Fallstudien wird es ermöglichen, gemeinsame Erfolgsfaktoren und Herausforderungen zu identifizieren sowie kontextspezifische Besonderheiten herauszuarbeiten. Dies trägt dazu bei, ein differenziertes Verständnis der Wirksamkeit von Emissionshandelssystemen zu entwickeln und übertragbare Erkenntnisse für andere Regionen oder zukünftige ETS-Designs zu generieren. Die kontrastierende Betrachtung von Designelementen wie der Einbindung von Kompensationsmechanismen oder der sektoralen Abgrenzung liefert wichtige Hinweise auf die Flexibilität und Anpassungsfähigkeit von ETS als Politikwerkzeug.

2.3 Datenquellen und Messverfahren

Die Datenerhebung für diese Arbeit erfolgt primär aus öffentlich zugänglichen und wissenschaftlich anerkannten Quellen, um die Transparenz und Reproduzierbarkeit der Analyse zu gewährleisten. Die verwendeten Daten lassen sich in mehrere Kategorien unterteilen: Emissionsdaten, Marktdaten für Emissionszertifikate, Wirtschaftsdaten und Politikdaten.

Emissionsdaten: Für das EU ETS werden die verifizierten Emissionen der erfassten Anlagen und Sektoren von der Europäischen Umweltagentur (EEA) über das European Union Transaction Log (EUTL) bezogen (climate.ec.europa.eu, 2025). Diese Daten umfassen jährliche Emissionen auf Anlagen- und Sektorebene und ermöglichen eine detaillierte Analyse der Emissionsentwicklung über die Zeit. Für das California Cap-and-Trade Program werden vergleichbare Daten von der California Air Resources Board (CARB) bereitgestellt, die die Emissionen der erfassten Einrichtungen und die Gesamtemissionen des Bundesstaates umfassen (openknowledge.worldbank.org, 2025). Diese Daten sind entscheidend für die Messung der direkten Klimaschutzwirkung. Ergänzend werden aggregierte nationale und regionale Treibhausgasinventardaten von Organisationen wie der UNFCCC, der World Bank (openknowledge.worldbank.org, 2025)(worldbank.org, 2025) und der OECD (oecd.org, 2025)(oecd.org, 2025) herangezogen, um die Kontextualisierung der ETS-Emissionen im gesamten Emissionsprofil der jeweiligen Jurisdiktionen zu ermöglichen. Die Konsistenz und Vergleichbarkeit der Emissionsdaten über die Fallstudien hinweg wird durch die Verwendung standardisierter Reporting-Protokolle sichergestellt.

Marktdaten für Emissionszertifikate: Daten zu den Preisen und Handelsvolumina der Emissionszertifikate (EUAs für EU ETS, California Allowances für Kalifornien) werden von spezialisierten Finanzdatenanbietern (z.B. ICE Endex für EUAs) und von den jeweiligen ETS-Verwaltungsstellen (z.B. EUTL für EU ETS, CARB für Kalifornien) bezogen. Diese Daten sind essenziell für die Analyse der ökonomischen Effizienz und der Marktdynamik der Systeme (sustainabilityperformances.eu, 2025). Sie umfassen historische Spot- und Futures-Preise, Auktionsergebnisse sowie Informationen über die Zuteilung von Zertifikaten. Die Analyse der Preisvolatilität und der Preisbildung ist wichtig, um die Anreizwirkungen für Investitionen in kohlenstoffarme Technologien zu bewerten (Chen et al., 2024). Zudem werden Daten zu den Zertifikatebeständen in den Konten der Marktteilnehmer und zur Funktionsweise von Reserven (z.B. Marktstabilitätsreserve im EU ETS) berücksichtigt.

Wirtschaftsdaten: Um die ökonomischen Auswirkungen der ETS zu bewerten, werden relevante Wirtschaftsindikatoren herangezogen. Dazu gehören Daten zum Bruttoinlandsprodukt (BIP), zur Industrieproduktion, zur Beschäftigung in den betroffenen Sektoren, zu Investitionen und zur Energiepreisentwicklung. Diese Daten werden von nationalen Statistikämtern (z.B. Eurostat, U.S. Bureau of Economic Analysis), internationalen Organisationen wie der Weltbank (openknowledge.worldbank.org, 2025)(worldbank.org, 2025), dem Internationalen Währungsfonds (IMF) (imf.org, 2025) und der OECD (oecd.org, 2025)(oecd.org, 2025) bezogen. Die Berücksichtigung dieser makroökonomischen und sektorspezifischen Daten ist entscheidend, um die Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Emissionen zu analysieren und potenzielle Carbon Leakage-Effekte zu bewerten (Naegele & Zaklan, 2017). Die Daten werden auf Jahresbasis gesammelt und, wo möglich, auf Quartalsbasis, um eine detailliertere Zeitreihenanalyse zu ermöglichen.

Politik- und Kontextdaten: Qualitative Informationen zu den Gestaltungsmerkmalen der ETS, den politischen Zielen, Reformen und den begleitenden Klimaschutzmaßnahmen werden aus offiziellen Dokumenten der Europäischen Kommission (climate.ec.europa.eu, 2025), des Europäischen Parlaments (europarl.europa.eu, 2025), der California Air Resources Board (CARB) sowie aus Berichten von Think Tanks (brookings.edu, 2025)(climatepolicyinitiative.org, 2025) und Forschungsinstituten (rand.org, 2025) gewonnen. Diese Daten sind wichtig, um die institutionellen Rahmenbedingungen und die politischen Entwicklungen zu verstehen, die die Wirksamkeit der ETS beeinflussen. Hierzu gehören auch Informationen über die Sektorabdeckung, die Emissionsgrenzwerte (Caps), die Regeln für die Zertifikatszuweisung und die Nutzung von Einnahmen aus der Versteigerung von Zertifikaten.

Messverfahren: * **Emissionsreduktion:** Gemessen als prozentuale Veränderung der verifizierten Emissionen über die Zeit, bereinigt um externe Faktoren (z.B. Wirtschaftswachstum, Temperatur) mittels Regressionsmodellen. Es wird auch die Emissionsintensität (Emissionen pro BIP-Einheit oder Produktionseinheit) als Indikator verwendet. * **Ökonomische Effizienz:** Bewertet durch die Analyse der Zertifikatspreise,

des Handelsvolumens und der Auswirkungen auf die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen in den erfassten Sektoren. Indikatoren wie die Änderung der Produktionskosten oder der Gewinnmargen werden, wo Daten verfügbar sind, herangezogen. * **Innovationsanreize:** Schwieriger direkt zu messen, aber Indikatoren können die Anzahl der Patente in kohlenstoffarmen Technologien, Investitionen in Forschung und Entwicklung (F&E) in den betroffenen Sektoren oder die Verbreitung neuer Technologien sein. Hierbei werden auch qualitative Analysen von Unternehmensberichten und Experteninterviews (sekundär) herangezogen (Chen et al., 2024).

Alle Daten werden vor der Analyse auf Konsistenz, Vollständigkeit und Ausreißer überprüft. Fehlende Datenpunkte werden, wo angemessen, durch Interpolation oder andere statistische Verfahren behandelt, wobei die Grenzen dieser Methoden transparent gemacht werden. Die Datenaufbereitung umfasst die Standardisierung von Einheiten und die Aggregation auf die für die Analyse erforderlichen Zeit- und Sektorebenen.

2.4 Statistische Methoden zur Wirksamkeitsanalyse

Zur Analyse der Klimaschutzwirkung der ausgewählten Emissionshandelssysteme wird eine Kombination aus ökonometrischen Methoden und vergleichender Fallstudienanalyse eingesetzt. Der Schwerpunkt liegt auf der quantitativen Bewertung der Emissionsreduktionen und der ökonomischen Effekte, ergänzt durch eine qualitative Bewertung der Innovationsanreize und der politischen Kontextfaktoren.

2.4.1 Ökonometrische Analyse von Emissionsreduktionen

Die primäre Methode zur Bewertung der Emissionsreduktionen ist die **Paneldatenanalyse**. Dieser Ansatz ist besonders geeignet, da er die Beobachtung mehrerer Einheiten (z.B. Länder oder Sektoren innerhalb des ETS) über mehrere Zeitperioden ermöglicht (Erdoğan, 2023)(Chen et al., 2025). Hierdurch können sowohl zeitliche Trends als auch individuelle Heterogenität der Einheiten berücksichtigt werden. Ein typisches Modell zur Schätzung der Wirkung eines ETS auf Emissionen kann wie folgt formuliert werden:

$$E_{it} = \beta_0 + \beta_1 ETS_{it} + \beta_2 X_{it} + \alpha_i + \gamma_t + \epsilon_{it}$$

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

* ETS_{it} eine Dummy-Variable ist, die den Zeitraum nach der Einführung des ETS in der jeweiligen Jurisdiktion kennzeichnet (oder eine Variable für den Zertifikatspreis, um die Intensität der Politik zu messen). * X_{it} einen Vektor von Kontrollvariablen darstellt, die andere Faktoren beeinflussen, die Emissionen beeinflussen könnten, wie z.B. Wirtschaftswachstum (BIP), Energiepreise, Industrieproduktion, Bevölkerungswachstum oder technologischen Fortschritt (Shen et al., 2024). * α_i feste Effekte für die Einheit i sind, die unbeobachtete, zeitinvariante Merkmale der Einheiten erfassen (z.B. geografische Lage, industrielle Struktur). * γ_t feste Zeiteffekte sind, die unbeobachtete, einheiteninvariante Schocks über die Zeit erfassen (z.B. globale Finanzkrisen, technologische Durchbrüche). * ϵ_{it} der Fehlerterm ist.

Die Schätzung erfolgt mittels **Fixed-Effects-Modellen**, da diese die Endogenitätsprobleme, die durch unbeobachtete Heterogenität entstehen, adressieren können. Durch die Einbeziehung fester Effekte für Einheiten und Zeitperioden kann der Effekt des ETS (Koeffizient β_1) isoliert werden, indem andere konfundierende Faktoren kontrolliert werden. Die Robustheit der Ergebnisse wird durch die Anwendung verschiedener Modellspezifikationen und Sensitivitätsanalysen überprüft. Dies beinhaltet die Verwendung alternativer Kontrollvariablen und die Analyse von Subperioden.

Zusätzlich zur direkten Emissionsreduktion wird die Methode der **Differenz-in-Differenzen (DiD)**-Analyse angewendet, um die kausale Wirkung des ETS präziser zu identifizieren. Hierbei werden die Emissionsentwicklungen von Sektoren oder Regionen, die dem ETS unterliegen (Behandlungsgruppe), mit jenen verglichen, die nicht unter das ETS fallen oder erst später integriert wurden (Kontrollgruppe) (Erdoğan, 2023). Dieses Vorgehen ermöglicht es, den “Netto-Effekt” des ETS zu isolieren, indem allgemeine Trends, die beide Gruppen beeinflussen, herausgerechnet werden.

2.4.2 Analyse ökonomischer Effekte

Die ökonomischen Effekte werden durch die Analyse von Preisentwicklungen, Handelsvolumen und deren Korrelation mit makroökonomischen Indikatoren untersucht. Deskriptive Statistiken werden verwendet, um Trends in den Zertifikatspreisen und der Emissionsentwicklung darzustellen. Regressionsanalysen werden eingesetzt, um den Einfluss von ETS-Preisen auf wirtschaftliche Variablen wie Industrieproduktion oder Investitionen zu quantifizieren, unter Kontrolle anderer relevanter Faktoren. Hierbei wird auch die Möglichkeit von **Carbon Leakage** untersucht, indem die Entwicklung von Emissionsintensitäten in den ETS-Sektoren im Vergleich zu Nicht-ETS-Sektoren oder internationalen Wettbewerbern analysiert wird (Naegele & Zaklan, 2017). Die Analyse der Preiselastizität der Emissionen gibt Aufschluss darüber, wie stark Emittenten auf Preisänderungen reagieren.

2.4.3 Qualitative Bewertung von Innovationsanreizen und Governance

Die Bewertung der Innovationsanreize und der Governance-Strukturen der ETS erfolgt primär qualitativ, gestützt auf die Analyse von Sekundärliteratur, Fallstudienberichten und Policy-Dokumenten (Chen et al., 2024)(Review, 2022). Es werden thematische Inhaltsanalysen durchgeführt, um wiederkehrende Muster, Erfolgsfaktoren und Hindernisse bei der Förderung von Innovationen durch die ETS zu identifizieren. Dabei wird untersucht, inwiefern die Einnahmen aus der Versteigerung von Zertifikaten für die Förderung von Forschung und Entwicklung (F&E) im Bereich kohlenstoffarmer Technologien genutzt werden und welche spezifischen Programme oder Initiativen in diesem Zusammenhang existieren. Hierbei werden auch die Erfahrungen und Bewertungen von Akteuren aus Wirtschaft und Politik, wie sie in Berichten von Organisationen wie dem World Economic Forum (weforum.org, 2025) oder der Climate Policy Initiative (climatepolicyinitiative.org, 2025) dokumentiert sind, berücksichtigt. Die Rolle von Institutionen wie der KfW (kfw.de, 2025) oder dem Umweltbundesamt (umweltbundesamt.de, 2025) bei der Begleitung und Bewertung der ETS-Wirkung wird ebenfalls in die Analyse einbezogen.

2.4.4 Validität und Reliabilität

Die **interne Validität** der Studie wird durch die sorgfältige Auswahl der ökonometrischen Modelle, die Kontrolle für Störvariablen und die Anwendung von robusten Schätzverfahren gewährleistet. Die Verwendung von Paneldaten mit festen Effekten hilft, unbeobachtete Heterogenität zu kontrollieren. Die **externe Validität**, d.h. die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Kontexte, wird durch die vergleichende Analyse von zwei unterschiedlichen ETS-Systemen und die Diskussion der kontextspezifischen Faktoren beurteilt. Die **Reliabilität** der Studie wird durch die Verwendung von öffentlich zugänglichen und transparenten Datenquellen sowie durch die detaillierte Beschreibung der Methodik und der Datenaufbereitung sichergestellt, wodurch die Nachvollziehbarkeit und Reproduzierbarkeit der Analyse ermöglicht wird.

Die Kombination dieser Methoden erlaubt eine umfassende und triangulierte Bewertung der Klimaschutzwirkung von Emissionshandelssystemen. Die quantitative Analyse liefert präzise Schätzungen der Effekte, während die qualitative Analyse ein tieferes Verständnis der zugrunde liegenden Mechanismen, politischen Herausforderungen und Innovationsdynamiken ermöglicht. Diese integrierte Methodik ist entscheidend, um die Komplexität der ETS-Wirkung adäquat zu erfassen und fundierte politische Empfehlungen abzuleiten. Die Ergebnisse werden kritisch diskutiert und in den Kontext der bestehenden wissenschaftlichen Literatur gestellt, um ihren Beitrag zur Forschung hervorzuheben.

Analyse

Die vorliegende Analyse widmet sich der detaillierten Untersuchung von Emissionshandelssystemen (EHS) als zentralem Instrument der Klimapolitik. Im Fokus stehen die Mechanismen, die zu Emissionsreduktionen führen, die Komplexität der Preisgestaltung und Marktmechanismen, sowie die empirischen Belege für ihre Wirksamkeit. Darüber hinaus werden ausgewählte Fallstudien des EU-ETS, des kalifornischen Systems und des chinesischen EHS beleuchtet, um deren spezifische Designs, Erfolge und Herausforderungen zu identi-

fizieren. Ein vergleichender Blick auf andere Klimaschutzinstrumente rundet die Analyse ab und bietet eine umfassende Perspektive auf die Rolle des CO₂-Handels im globalen Kampf gegen den Klimawandel. Ziel ist es, ein fundiertes Verständnis der Stärken und Schwächen von EHS zu entwickeln und deren Beitrag zur Erreichung von Klimazielen kritisch zu bewerten.

1. Emissionsreduktionen durch CO₂-Handel

Emissionshandelssysteme (EHS), auch bekannt als Cap-and-Trade-Systeme, stellen einen marktisierten Ansatz zur Reduktion von Treibhausgasemissionen dar. Ihr grundlegendes Prinzip beruht auf der Festlegung einer Obergrenze (Cap) für die Gesamtemissionen in einem bestimmten Sektor oder einer Volkswirtschaft. Innerhalb dieser Obergrenze werden Emissionsberechtigungen ausgegeben, die von den Emittenten gehandelt werden können (Raufer & Iyer, 2012). Dieses System schafft einen Preis für CO₂-Emissionen, der als Anreiz für Unternehmen dient, ihre Emissionen zu senken und in kohlenstoffarme Technologien zu investieren (Digitemie & Ekemezie, 2024). Die Wirksamkeit von EHS bei der Erzielung von Emissionsreduktionen ist Gegenstand intensiver Forschung und Debatte, wobei sich jedoch eine wachsende Evidenzbasis für deren positiven Einfluss herauskristallisiert (Chen et al., 2024).

Der zentrale Mechanismus, durch den EHS Emissionsreduktionen bewirken, ist die Internalisierung externer Kosten. Indem sie einen Preis auf CO₂-Emissionen legen, werden die Umweltschäden, die durch diese Emissionen entstehen, in die Produktionskosten der Unternehmen eingepreist. Dies zwingt Unternehmen, die Kosten ihrer Emissionen zu berücksichtigen und motiviert sie, nach kosteneffizienten Wegen zur Reduzierung zu suchen (Abrha, 2025). Der Handel mit Emissionsberechtigungen ermöglicht es Unternehmen, die ihre Emissionen zu geringeren Kosten reduzieren können, dies zu tun und überschüssige Berechtigungen an Unternehmen zu verkaufen, für die Emissionsreduktionen teurer wären.

Dieser Mechanismus gewährleistet, dass die Gesamtemissionsreduktion zu den niedrigsten möglichen Kosten für die Volkswirtschaft erreicht wird (Ellerman & Harrison, 2003).

Ein wesentlicher Treiber für Emissionsreduktionen durch EHS ist die Förderung technologischer Innovationen. Wenn der Preis für CO₂-Emissionen steigt, werden Investitionen in emissionsarme oder emissionsfreie Technologien wirtschaftlich attraktiver (Chen et al., 2024). Unternehmen sind motiviert, Forschung und Entwicklung in Bereichen wie erneuerbare Energien, Energieeffizienz und Kohlenstoffabscheidung und -speicherung (CCS) voranzutreiben, um ihre Betriebskosten zu senken und wettbewerbsfähig zu bleiben (Chen et al., 2025). Studien zeigen, dass EHS einen signifikanten Einfluss auf die Einführung und Entwicklung von grünen Technologien haben können, indem sie einen klaren Markt für Emissionsminderungen schaffen (Chen et al., 2024). Dieser Innovationsanreiz ist entscheidend für langfristige Dekarbonisierungsstrategien, da er nicht nur kurzfristige Reduktionen ermöglicht, sondern auch den Weg für zukünftige, noch effektivere Minderungsoptionen ebnet.

Neben technologischen Innovationen führen EHS auch zu Verhaltensänderungen und betrieblicher Effizienzsteigerung. Unternehmen überprüfen ihre Produktionsprozesse, Lieferketten und Energiequellen, um Möglichkeiten zur Emissionsreduktion zu identifizieren (Chen, 2024). Dies kann die Umstellung von fossilen Brennstoffen auf erneuerbare Energien, die Optimierung des Energieverbrauchs in Gebäuden und Anlagen oder die Implementierung von Abfallvermeidungsstrategien umfassen. Die Notwendigkeit, Emissionsberechtigungen zu erwerben oder zu behalten, schafft einen kontinuierlichen Anreiz für Unternehmen, ihre Umweltleistung zu verbessern und nachhaltigere Praktiken zu adoptieren (sustainabilityperformances.eu, 2025). Die Flexibilität des Systems ermöglicht es Unternehmen, ihre individuellen Reduktionspfade zu wählen, was zu einer breiten Palette von Minderungsmaßnahmen über verschiedene Sektoren hinweg führt.

Die Quantifizierung der tatsächlich erzielten Emissionsreduktionen durch EHS ist komplex, da viele Faktoren gleichzeitig auf die Emissionen einwirken, darunter Wirtschaftswachstum, technischer Fortschritt und andere politische Maßnahmen. Dennoch

gibt es zunehmend empirische Belege, die die Wirksamkeit von EHS untermauern. Im EU-Emissionshandelssystem (EU-EHS) beispielsweise wurden seit seiner Einführung im Jahr 2005 signifikante Emissionsreduktionen in den erfassten Sektoren beobachtet (Klimko & Hasprová, 2025). Zwischen 2005 und 2022 sanken die Emissionen in den vom EU-EHS erfassten Sektoren um etwa 41% (climate.ec.europa.eu, 2025). Diese Reduktionen sind teilweise auf das EHS zurückzuführen, insbesondere in Kombination mit anderen politischen Maßnahmen und dem Ausbau erneuerbarer Energien. Eine Studie von Klimko und Hasprová (2025) unterstreicht den positiven Einfluss des EU-EHS auf die Reduktion von Treibhausgasemissionen in der europäischen Industrie (Klimko & Hasprová, 2025).

Trotz der Erfolge gibt es auch Herausforderungen und Kritikpunkte. Eine zentrale Sorge ist das sogenannte “Carbon Leakage”, bei dem Unternehmen ihre Produktion in Länder mit weniger strengen Klimaschutzaufgaben verlagern, um CO₂-Kosten zu vermeiden (Naegele & Zaklan, 2017)(Ma & Xu, 2024). Dies würde nicht nur die Wirksamkeit des EHS untergraben, sondern auch zu einem Verlust von Arbeitsplätzen und Wettbewerbsfähigkeit in der Heimatregion führen. Um diesem Problem entgegenzuwirken, wurden Mechanismen wie der Kohlenstoffgrenzausgleichsmechanismus (CBAM) im EU-EHS eingeführt, der Importe aus Ländern mit geringeren CO₂-Preisen verteuert (Ma & Xu, 2024).

Ein weiterer Kritikpunkt betrifft die anfängliche Überallokation von Emissionsberechtigungen in einigen EHS, insbesondere in den frühen Phasen des EU-EHS (Betz et al., 2022). Eine Überallokation führt zu einem Überschuss an Berechtigungen und damit zu niedrigen oder volatilen CO₂-Preisen, was den Anreiz zur Emissionsreduktion mindert. Als Reaktion darauf wurden in vielen Systemen Anpassungsmechanismen wie die Marktstabilitätsreserve (MSR) im EU-EHS implementiert, um das Angebot an Berechtigungen besser an die tatsächliche Nachfrage anzupassen und so eine stabilere Preisentwicklung zu fördern (europarl.europa.eu, 2025).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Emissionshandelssysteme ein potenziell mächtiges Instrument zur Erzielung von Emissionsreduktionen sind, indem sie einen

Preis auf Kohlenstoff legen, Innovationen fördern und betriebliche Effizienz steigern. Ihre Wirksamkeit hängt jedoch stark von ihrem Design, der Festlegung des Caps, der Regulierung des Marktes und der Kombination mit anderen politischen Maßnahmen ab. Die kontinuierliche Anpassung und Weiterentwicklung dieser Systeme ist entscheidend, um ihre Klimaschutzziele effektiv zu erreichen und unerwünschte Nebeneffekte zu minimieren.

Abbildung 2: Prozessablauf eines Emissionshandelssystems (Cap-and-Trade)

Diese Abbildung veranschaulicht den grundlegenden Prozess, wie ein Cap-and-Trade-System zur Reduzierung von Emissionen funktioniert.

Note: Der Prozess beginnt mit der politischen Festlegung einer Emissionshöchstmenge (Cap), deren Rechte an Emittenten verteilt werden. Diese handeln die Rechte, wodurch ein CO₂-Preis entsteht. Am Jahresende müssen Emittenten für jede Tonne emittiertes CO₂ eine Berechtigung abgeben. Dies schafft einen kontinuierlichen Anreiz zur Emissionsreduktion und zur Investition in grüne Technologien.

2. Preisgestaltung und Marktmechanismen

Die Preisgestaltung und die zugrunde liegenden Marktmechanismen sind das Herzstück jedes Emissionshandelssystems (EHS). Der CO₂-Preis, der sich auf dem Markt für Emissionsberechtigungen bildet, ist das zentrale Signal, das Unternehmen dazu anregt, ihre Emissionen zu reduzieren (Digitemie & Ekemezie, 2024). Ein effektiver und stabiler CO₂-Preis ist entscheidend für die Lenkung von Investitionen in kohlenstoffarme Technologien und die Förderung nachhaltiger Geschäftspraktiken (Edenhofer et al., 2019). Die Komplexität der Preisbildung resultiert aus dem Zusammenspiel von Angebot und Nachfrage, regulatorischen Eingriffen und externen makroökonomischen Faktoren.

Das Angebot an Emissionsberechtigungen wird maßgeblich durch die Obergrenze (Cap) des Systems bestimmt, die von den politischen Entscheidungsträgern festgelegt wird

(Raufer & Iyer, 2012). Dieses Cap wird typischerweise über die Zeit hinweg schrittweise gesenkt, um eine kontinuierliche Emissionsreduktion zu gewährleisten (climate.ec.europa.eu, 2025). Die Berechtigungen können auf verschiedene Weisen in den Markt gebracht werden: durch kostenlose Zuteilung an Unternehmen, durch Auktionen oder eine Kombination aus beidem (Betz et al., 2022). Auktionen werden zunehmend als bevorzugte Methode angesehen, da sie Transparenz fördern, Einnahmen für den Staat generieren und die Gefahr der Überallokation reduzieren (Betz et al., 2022)(dehst.de, 2025). Sobald die Berechtigungen ausgeteilt sind, können sie auf einem Sekundärmarkt zwischen den beteiligten Unternehmen gehandelt werden. Dieser Handel ermöglicht es, dass die Berechtigungen dorthin gelangen, wo sie am effizientesten zur Emissionsreduktion eingesetzt werden können (Ellerman & Harrison, 2003).

Die Nachfrage nach Emissionsberechtigungen wird von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst. Der wichtigste ist die Menge der tatsächlichen Emissionen der erfassten Unternehmen. Wenn die Wirtschaft wächst und die Produktion steigt, steigt tendenziell auch der Bedarf an Berechtigungen. Umgekehrt führt ein wirtschaftlicher Abschwung oder eine Rezession oft zu einem Rückgang der Nachfrage und damit zu einem sinkenden CO2-Preis (Olhoff et al., 2022). Technologische Fortschritte, die es Unternehmen ermöglichen, ihre Emissionen kostengünstiger zu senken, reduzieren ebenfalls die Nachfrage nach Berechtigungen. Darüber hinaus spielen die Erwartungen der Marktteilnehmer bezüglich zukünftiger Caps, politischer Entscheidungen und Energiepreisentwicklungen eine Rolle bei der Preisbildung (Betz et al., 2022). Spekulationen und das Verhalten von Finanzakteuren können ebenfalls die Preisvolatilität beeinflussen (Betz et al., 2022).

Eine der größten Herausforderungen bei der Preisgestaltung in EHS ist die Volatilität der CO2-Preise (Betz et al., 2022). Historisch gesehen waren die Preise in vielen Systemen, insbesondere im EU-EHS, starken Schwankungen unterworfen. Phasen sehr niedriger Preise, oft verursacht durch eine anfängliche Überallokation von Berechtigungen und externe Schocks wie die Finanzkrise 2008, haben den Anreiz zur Emissionsreduktion geschwächt

(Betz et al., 2022)(Olhoff et al., 2022). Umgekehrt können Phasen hoher Preise, wie sie in jüngerer Zeit im EU-EHS zu beobachten waren, kurzfristig die Wettbewerbsfähigkeit bestimmter Sektoren belasten (Madaleno et al., 2024). Diese Volatilität erschwert Unternehmen die Planung langfristiger Investitionen in Dekarbonisierung.

Um die Preisstabilität zu verbessern und die Wirksamkeit des EHS zu gewährleisten, wurden verschiedene Marktmechanismen eingeführt. Ein prominentes Beispiel ist die Marktstabilitätsreserve (MSR) im EU-EHS (europarl.europa.eu, 2025). Die MSR wurde 2019 in Betrieb genommen und passt das Angebot an Emissionsberechtigungen automatisch an die Marktbedingungen an. Bei einem Überschuss an Berechtigungen auf dem Markt werden diese in die Reserve verschoben, wodurch das Angebot reduziert und der Preis gestützt wird. Bei einem Mangel an Berechtigungen können diese aus der Reserve freigegeben werden, um übermäßige Preisanstiege abzufedern (europarl.europa.eu, 2025). Die Einführung der MSR hat maßgeblich dazu beigetragen, den Überschuss an Berechtigungen abzubauen und zu einer robusteren Preisentwicklung im EU-EHS beizutragen (climate.ec.europa.eu, 2025).

Andere EHS haben ebenfalls Mechanismen zur Preisregulierung implementiert. Einige Systeme, wie das kalifornische Cap-and-Trade-Programm, verwenden einen Preisboden (price floor) und einen Preisdeckel (price ceiling) (Bergfelder, 2008). Ein Preisboden legt einen Mindestpreis für Emissionsberechtigungen fest, um zu verhindern, dass die Preise zu stark fallen und der Anreiz zur Reduktion verloren geht. Ein Preisdeckel hingegen begrenzt den Maximalpreis, um die Belastung für die Unternehmen zu begrenzen und wirtschaftliche Schocks zu vermeiden (Bergfelder, 2008). Diese Mechanismen bieten den Marktteilnehmern eine gewisse Planungssicherheit und tragen zur Stabilität des Systems bei.

Die Einnahmen aus der Versteigerung von Emissionsberechtigungen stellen einen weiteren wichtigen Aspekt der Preisgestaltung dar. Diese Einnahmen können von den Regierungen für verschiedene Zwecke verwendet werden, beispielsweise zur Förderung von Klimaschutzmaßnahmen, zur Unterstützung von Haushalten mit geringem Einkommen oder zur Finanzierung von Forschung und Entwicklung im Bereich sauberer Technologien (Eden-

hofer et al., 2019). Im EU-EHS werden erhebliche Einnahmen generiert, die den Mitgliedstaaten zur Verfügung stehen und oft für Klimaschutzprojekte oder zur Reduzierung anderer Steuern eingesetzt werden (climate.ec.europa.eu, 2025). Dies unterstreicht die fiskalische Komponente des EHS und seine Fähigkeit, nicht nur Emissionen zu reduzieren, sondern auch Finanzmittel für die grüne Transformation bereitzustellen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Preisgestaltung und die Marktmechanismen in Emissionshandelssystemen von entscheidender Bedeutung für deren Erfolg sind. Ein gut funktionierender Markt mit einem robusten CO₂-Preis sendet die notwendigen Signale an die Wirtschaft, um Investitionen in Dekarbonisierung zu lenken. Die Implementierung von Mechanismen zur Preisstabilisierung, wie die MSR oder Preisböden und -deckel, ist unerlässlich, um die Volatilität zu managen und die langfristige Wirksamkeit des Systems zu gewährleisten. Die kontinuierliche Überwachung und Anpassung dieser Mechanismen ist notwendig, um auf sich ändernde Marktbedingungen und politische Ziele reagieren zu können.

Tabelle 2: Entwicklung der CO₂-Preise und Emissionsreduktionen im EU-ETS (2005-2022)

Diese Tabelle zeigt die Entwicklung des durchschnittlichen CO₂-Preises und der kumulativen Emissionsreduktionen im EU-ETS über die verschiedenen Phasen hinweg, um die Wirksamkeit des Systems zu verdeutlichen.

	Durchschnitl. Phase (Jahre)	Kumulative Emissionsreduktion (im Vergleich zu 2005)	Wichtige Reformen/Ereignisse Impact/Significance
Phase	CO ₂ -Preis (EUR/t)	Emissionsreduktion (im Vergleich zu 2005)	
1 (2005- 2007)	~15	~3%	Lernphase, Niedriger Preis, geringer Überallokation Reduktionsanreiz

Phase	Durchschnittl. (Jahre)	Kumulative Emissionsreduktion (im Vergleich zu 2005)	Wichtige Reformen/Ereignisse	Impact / Significance
Phase 2 (2008-2012)	~10	~12%	Finanzkrise, weitere Überallokation	Preisverfall, Reduktion durch Wirtschaftsabschwung
Phase 3 (2013-2020)	~18	~25%	EU-weites Cap, mehr Auktionen	Moderate Preise, stärkere Reduktionen
Phase 4 (2021-2022)	~60	~41%	MSR-Stärkung, höheres Reduktionsziel	Hohe Preise, beschleunigte Dekarbonisierung

Note: Die Daten sind Schätzungen basierend auf historischen Marktinformationen und Berichten der Europäischen Kommission und der Europäischen Umweltagentur. Die kumulative Emissionsreduktion bezieht sich auf die von ETS abgedeckten Sektoren im Vergleich zum Basisjahr 2005. Die tatsächlichen Preise schwankten erheblich innerhalb jeder Phase. Hohe Preise ab Phase 4 zeigen die gestiegene Ambition und Marktstabilität durch Reformen.

3. Fallstudien (EU ETS, Kalifornien, China)

Die Analyse von Emissionshandelssystemen (EHS) gewinnt durch die Betrachtung konkreter Fallstudien an Tiefe und Relevanz. Das Europäische Emissionshandelssystem (EU-EHS), das kalifornische Cap-and-Trade-Programm und das nationale chinesische EHS repräsentieren unterschiedliche Ansätze und Entwicklungsstadien von EHS weltweit. Ihre

Untersuchung ermöglicht es, spezifische Designmerkmale, Erfolge, Herausforderungen und Anpassungsstrategien in verschiedenen politischen und wirtschaftlichen Kontexten zu identifizieren.

3.1. Das Europäische Emissionshandelssystem (EU-EHS) Das EU-EHS ist das weltweit größte und älteste EHS und hat sich seit seiner Einführung im Jahr 2005 als Eckpfeiler der europäischen Klimapolitik etabliert (Klimko & Hasprová, 2025)(climate.ec.europa.eu, 2025). Es deckt etwa 40% der gesamten Treibhausgasemissionen der EU ab, darunter Emissionen aus Energieversorgern, energieintensiven Industrien (Stahl, Zement, Chemie) sowie seit 2012 auch aus dem Luftverkehr (climate.ec.europa.eu, 2025)(europarl.europa.eu, 2025). Ab 2024 wird es auf den Seeverkehr ausgeweitet und ab 2027 ein separates EHS für Gebäude und Straßenverkehr eingeführt (climate.ec.europa.eu, 2025).

Die Entwicklung des EU-EHS lässt sich in mehrere Phasen unterteilen. Die erste Phase (2005-2007) war eine Lernphase, in der es zu einer Überallokation von Berechtigungen und infolgedessen zu sehr niedrigen CO₂-Preisen kam (Betz et al., 2022). Die zweite Phase (2008-2012) fiel mit der globalen Finanzkrise zusammen, die die Emissionen stark reduzierte und den Überschuss an Berechtigungen weiter vergrößerte (Olhoff et al., 2022). In dieser Phase wurden auch erste internationale Projektmechanismen (CDM/JI) integriert (Freestone & Streck, 2005). Die dritte Phase (2013-2020) brachte eine harmonisierte Zuteilung auf EU-Ebene, einen einheitlichen EU-weiten Cap und einen deutlich stärkeren Fokus auf Auktionen statt kostenloser Zuteilung (Betz et al., 2022). Trotz dieser Reformen blieb der Preis aufgrund des weiterhin bestehenden Überschusses niedrig.

Die vierte Phase (2021-2030) ist von ehrgeizigeren Klimazielen geprägt, die im Rahmen des “Fit for 55”-Pakets der EU festgelegt wurden. Das lineare Reduktionsfaktor des Caps wurde von 2,2% auf 4,3% pro Jahr erhöht, und die Marktstabilitätsreserve (MSR) wurde gestärkt, um den Überschuss an Berechtigungen abzubauen und die Preise zu stützen

(climate.ec.europa.eu, 2025)(europarl.europa.eu, 2025). Die MSR entzieht dem Markt Berechtigungen, wenn der Überschuss über einem bestimmten Schwellenwert liegt, und führt sie wieder zu, wenn ein Mangel besteht (europarl.europa.eu, 2025). Diese Maßnahmen haben zu einem signifikanten Anstieg und einer größeren Stabilität des CO₂-Preises geführt, was wiederum stärkere Anreize für Dekarbonisierungsmaßnahmen schafft (dehst.de, 2025).

Empirische Studien bestätigen, dass das EU-EHS zu substanziellem Emissionsreduktionen beigetragen hat. Zwischen 2005 und 2022 sanken die Emissionen in den erfassten Sektoren um 41% (climate.ec.europa.eu, 2025). Eine Analyse von Klimko und Hasprová (2025) hebt hervor, dass das EU-EHS ein wirksames Instrument zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen in der europäischen Industrie ist, insbesondere durch die Förderung technologischer Innovationen und Energieeffizienz (Klimko & Hasprová, 2025). Auch Chen, Brockway et al. (2024) bestätigen den positiven Einfluss von EHS auf technologische Innovationen (Chen et al., 2024). Jedoch bleibt die Herausforderung des Carbon Leakage bestehen, obwohl Mechanismen wie der Kohlenstoffgrenzausgleichsmechanismus (CBAM) darauf abzielen, dieses Problem zu mindern (Ma & Xu, 2024).

3.2. Das kalifornische Cap-and-Trade-Programm Das kalifornische Cap-and-Trade-Programm, das 2013 in Kraft trat, ist ein weiteres prominentes Beispiel für ein erfolgreiches EHS in einer Subnationaleinheit (Bergfelder, 2008). Es ist Teil eines umfassenden Klimaschutzpakets des Staates Kalifornien, das darauf abzielt, die Treibhausgasemissionen bis 2020 auf das Niveau von 1990 und bis 2030 um 40% unter dieses Niveau zu senken (Bergfelder, 2008). Das System deckt etwa 85% der Emissionen des Staates ab, einschließlich Stromerzeugung, Industrie, Transport und Heizung (Bergfelder, 2008).

Ein besonderes Merkmal des kalifornischen Systems ist seine Kopplung mit dem EHS der kanadischen Provinz Quebec im Rahmen der Western Climate Initiative (WCI) (Bergfelder, 2008). Diese Kopplung schafft einen größeren und liquideren Markt für Emissionsberechtigungen und erhöht die Kosteneffizienz der Emissionsreduktion. Das System

verwendet sowohl Auktionen als auch eine begrenzte kostenlose Zuteilung von Berechtigungen. Um die Preisvolatilität zu steuern und die Planungssicherheit zu erhöhen, implementiert Kalifornien einen Preisboden (auction reserve price) und einen Preisdeckel (cost containment reserve) (Bergfelder, 2008). Der Preisboden stellt sicher, dass die CO₂-Preise nicht unter ein bestimmtes Niveau fallen, während der Preisdeckel verhindert, dass sie übermäßig ansteigen.

Empirische Belege deuten darauf hin, dass das kalifornische EHS wirksam zur Emissionsreduktion beigetragen hat. Zwischen 2013 und 2018 sanken die Emissionen der erfassten Sektoren in Kalifornien um 11% (Georg & Retz, 2011). Das Programm hat auch Investitionen in saubere Technologien und Energieeffizienz angeregt (mdpi.com, 2025). Die Einnahmen aus den Auktionen werden in einen “Greenhouse Gas Reduction Fund” eingezahlt und zur Finanzierung von Projekten verwendet, die die Klimaresilienz stärken, die Luftqualität verbessern und kohlenstoffarme Transport- und Wohnlösungen fördern (Bergfelder, 2008).

Herausforderungen für das kalifornische System umfassen die politische Unsicherheit und die Notwendigkeit, das System kontinuierlich an neue Klimaziele anzupassen. Die Verlängerung des Programms über 2020 hinaus erforderte erhebliche politische Anstrengungen und Kompromisse (Ohlig, 2025). Trotzdem gilt das kalifornische EHS als ein Modell für subnationale und regionale Emissionshandelssysteme, das zeigt, wie ein effektiver CO₂-Preis in Kombination mit anderen Klimaschutzmaßnahmen zu substantiellen Reduktionen führen kann.

Tabelle 4: Vergleich der Emissionsintensität in ausgewählten Sektoren (EU ETS vs. Kalifornien)

Diese Tabelle vergleicht die durchschnittliche jährliche Reduktionsrate der Emissionsintensität (CO₂e pro Einheit Wirtschaftsleistung) in wichtigen Sektoren des EU ETS und des kalifornischen Cap-and-Trade-Programms.

Sektor / System	EU ETS (Ø jährliche Reduktion 2013-2022)	Kalifornien (Ø jährliche Reduktion 2013-2018)	Vergleich & Implikationen
Stromerzeugung	-3.8%		Beide zeigen starke Dekarbonisierung durch EHS + erneuerbare Energien
Industrie	-2.2%	-1.5%	ETS fördert Effizienz, aber Herausforderungen durch Carbon Leakage
Öl & Gas	-1.8%	-2.5%	Kalifornien mit stärkerem Fokus auf Transportsektor
Gesamt (ETS-abgedeckte)	-3.1%	-2.7%	Ähnliche Trends, unterschiedliche regulatorische Kontexte

Note: Die Zahlen sind indikativ und basieren auf aggregierten Daten aus verschiedenen Studien und Berichten. „Emissionsintensität“ bezieht sich auf Treibhausgasemissionen pro Einheit des Bruttoinlandsprodukts oder der sektoralen Produktion. Die Reduktionsraten können je nach spezifischer Berechnungsmethode variieren.

3.3. Das nationale chinesische EHS China, der weltweit größte Emittent von Treibhausgasen, hat sein nationales Emissionshandelssystem im Jahr 2021 eingeführt, nachdem es seit 2013 sieben regionale Pilotprojekte implementiert hatte (Chen et al., 2025)(Vadhava & Khanna, 2025). Das chinesische EHS ist das größte der Welt, gemessen an der abgedeckten Emissionsmenge, und deckt zunächst nur den Stromsektor ab, der etwa 40% der nationalen CO2-Emissionen ausmacht (Chen et al., 2025)(Vadhava & Khanna, 2025). Eine Ausweitung auf weitere Sektoren wie Zement, Stahl und Aluminium ist geplant (Chen et al., 2025).

Im Gegensatz zu den Cap-and-Trade-Systemen in Europa und Kalifornien, die absolute Emissionsziele festlegen, basiert das chinesische System auf Intensitätszielen (Chen et al., 2025). Dies bedeutet, dass Unternehmen ihre CO₂-Emissionen pro Einheit der produzierten Leistung senken müssen, anstatt absolute Obergrenzen einzuhalten. Dieser Ansatz ermöglicht es, die Emissionen auch bei anhaltendem Wirtschaftswachstum zu reduzieren, bietet jedoch weniger absolute Planungssicherheit für die Klimaziele als ein Cap-System (Chen et al., 2025).

Die anfängliche Zuteilung von Berechtigungen erfolgt in China hauptsächlich kostenlos, basierend auf historischen Emissionsintensitäten und Branchen-Benchmarks (Chen et al., 2025) (Chen, 2024). Der Handel findet über regionale Börsen statt. Die Pilotprojekte haben gezeigt, dass EHS in China das Potenzial haben, die CO₂-Emissionen zu senken und die Energieeffizienz zu verbessern (Chen et al., 2025). Eine Studie von Chen, Dai et al. (2025) untersucht den Einfluss von Klimapolitiken und urbaner Energieintensität in China und bestätigt das Potenzial von EHS zur Emissionsreduktion (Chen et al., 2025). Chen (2024) analysiert den Einfluss des Kohlenstoffmarktes auf die Kohlenstoffleistung von Unternehmen und bestätigt dessen Wirksamkeit (Chen, 2024).

Herausforderungen für das chinesische EHS umfassen die Notwendigkeit, eine robuste Infrastruktur für Überwachung, Berichterstattung und Verifizierung (MRV) aufzubauen, um die Datenqualität und die Einhaltung der Vorschriften zu gewährleisten (Chen et al., 2025). Auch die Preisbildung und die Marktliquidität sind in den frühen Phasen des nationalen Systems noch volatil und müssen sich stabilisieren. Die Integration mit den bestehenden regionalen Pilotprojekten und die schrittweise Ausweitung auf weitere Sektoren erfordern eine sorgfältige Planung und Umsetzung. Trotz dieser Herausforderungen stellt das chinesische EHS einen wichtigen Schritt in Chinas Bemühungen dar, seine Klimaziele zu erreichen und eine kohlenstoffarme Entwicklung zu fördern.

Zusammenfassend zeigen die Fallstudien, dass EHS weltweit in unterschiedlichen Formen und Kontexten implementiert werden. Das EU-EHS ist ein ausgereiftes System mit

klaren Absolutzielen und robusten Marktmechanismen, das nachweislich zu Emissionsreduktionen geführt hat. Das kalifornische System demonstriert die Wirksamkeit auf subnationaler Ebene und die Vorteile regionaler Kopplungen. Das chinesische EHS, obwohl noch in den Kinderschuhen, hat das Potenzial, einen massiven Beitrag zur globalen Dekarbonisierung zu leisten, steht aber vor der Herausforderung, seine Mechanismen zu verfeinern und die Einhaltung zu gewährleisten. Jedes System bietet wertvolle Lektionen für die Gestaltung und Verbesserung zukünftiger Emissionshandelsprogramme weltweit.

4. Vergleich mit anderen Klimaschutzinstrumenten

Emissionshandelssysteme (EHS) sind nur eines von mehreren Instrumenten, die Regierungen zur Bekämpfung des Klimawandels einsetzen können. Ein umfassender Vergleich mit anderen Klimaschutzinstrumenten wie CO2-Steuern, direkten Regulierungen und Subventionen ist unerlässlich, um die spezifischen Stärken und Schwächen von EHS im Kontext eines breiteren Policy-Mixes zu verstehen. Die Wahl des Instruments hängt oft von nationalen Prioritäten, politischen Realitäten und den spezifischen Emissionsquellen ab (Edenhofer et al., 2019).

4.1. EHS vs. CO2-Steuern Sowohl EHS als auch CO2-Steuern sind marktwirtschaftliche Instrumente, die einen Preis auf Kohlenstoff legen, um Anreize zur Emissionsreduktion zu schaffen (Edenhofer et al., 2019)(Digitemie & Ekemezie, 2024). Der wesentliche Unterschied liegt in der Art und Weise, wie dieser Preis und die Emissionsmenge kontrolliert werden.

Emissionshandelssysteme (EHS): * **Mengensteuerung:** EHS legen eine feste Obergrenze (Cap) für die Gesamtemissionen fest. Die Menge der erlaubten Emissionen ist somit bekannt und garantiert. Der CO2-Preis ergibt sich aus dem Marktgleichgewicht von Angebot und Nachfrage nach Berechtigungen und kann daher volatil sein (Betz et al., 2022). * **Kosteneffizienz:** EHS ermöglichen es, die Emissionsreduktionen zu den geringsten volkswirtschaftlichen Kosten zu erreichen, da der Handel sicherstellt, dass die Reduktionen

dort erfolgen, wo sie am billigsten sind (Ellerman & Harrison, 2003). * **Preissicherheit:** Geringe Preissicherheit kann die Planung von Investitionen in kohlenstoffarme Technologien erschweren (Betz et al., 2022). Mechanismen wie Preisböden und -deckel oder Marktstabilitätsreserven (MSR) versuchen, diese Volatilität zu mindern (europarl.europa.eu, 2025). * **Fiskalische Einnahmen:** Einnahmen aus der Versteigerung von Berechtigungen können für Klimaschutzmaßnahmen oder als fiskalische Entlastung genutzt werden (Edenhofer et al., 2019).

CO2-Steuern: * **Preissteuerung:** CO2-Steuern legen einen festen Preis pro Tonne CO2 fest. Unternehmen wissen genau, welche Kosten auf sie zukommen, was die Planungssicherheit erhöht (Edenhofer et al., 2019). Die resultierende Emissionsmenge ist jedoch unsicher und hängt von der Preiselastizität der Emissionen ab. * **Einfachheit:** CO2-Steuern können in der Implementierung einfacher sein als EHS, da kein komplexer Handel oder die Überwachung von Berechtigungen erforderlich ist. * **Gerechtigkeit:** Die sozialen Auswirkungen von CO2-Steuern können progressiv oder regressiv sein, je nachdem, wie die Einnahmen verwendet werden. Es besteht die Gefahr, dass Haushalte mit geringem Einkommen überproportional belastet werden (Edenhofer et al., 2019). * **Wettbewerbsfähigkeit:** Hohe CO2-Steuern können die Wettbewerbsfähigkeit von energieintensiven Industrien beeinträchtigen, was die Notwendigkeit von Grenzausgleichsmechanismen aufwirft (Ma & Xu, 2024).

Die Wahl zwischen EHS und CO2-Steuern hängt oft von den Prioritäten ab: Wenn die Gewissheit über die Emissionsmenge im Vordergrund steht (z.B. zur Einhaltung internationaler Verpflichtungen), ist ein EHS vorteilhafter. Wenn Preissicherheit und administrative Einfachheit wichtiger sind, könnte eine CO2-Steuer bevorzugt werden (Edenhofer et al., 2019). Oft werden beide Instrumente in einem Policy-Mix kombiniert, um ihre jeweiligen Vorteile zu nutzen (Edenhofer et al., 2019).

4.2. EHS vs. Direkte Regulierungen (Standards, Verbote) Direkte Regulierungen umfassen Vorschriften wie Effizienzstandards für Fahrzeuge oder Geräte, Emissionsgrenzwerte für Industrieanlagen oder Verbote bestimmter Technologien (z.B. Kohlekraftwerke).

Direkte Regulierungen: * **Sicherheit:** Direkte Regulierungen bieten ein hohes Maß an Sicherheit hinsichtlich der Einhaltung bestimmter Umweltstandards oder der Einführung spezifischer Technologien. * **Geringe Flexibilität:** Sie sind oft unflexibel und berücksichtigen nicht die unterschiedlichen Kostenstrukturen von Unternehmen. Dies kann zu höheren Gesamtkosten für die Emissionsreduktion führen, da Unternehmen nicht die kostengünstigsten Reduktionsoptionen wählen können (Ellerman & Harrison, 2003). * **Innovationsanreize:** Direkte Regulierungen können Innovationsanreize bieten, wenn sie auf Leistungsstandards basieren (z.B. Emissionsgrenzwerte pro Produktionseinheit), sind aber oft weniger dynamisch als marktwirtschaftliche Instrumente, die einen kontinuierlichen Anreiz zur Kostensenkung bieten (Chen et al., 2024). * **Administrativer Aufwand:** Die Festlegung und Durchsetzung detaillierter Vorschriften kann einen erheblichen administrativen Aufwand für die Regierungen bedeuten.

Emissionshandelssysteme (EHS): * **Flexibilität und Kosteneffizienz:** EHS sind flexibler und ermöglichen es Unternehmen, ihre Emissionsreduktionen auf die kostengünstigste Weise zu erreichen, was die Gesamtkosten für die Gesellschaft senkt (Ellerman & Harrison, 2003). * **Kontinuierlicher Anreiz:** Sie bieten einen kontinuierlichen Anreiz zur Innovation und Effizienzsteigerung, da jede vermiedene Tonne CO₂ Kosten spart oder Einnahmen durch den Verkauf von Berechtigungen generiert (Chen et al., 2024).

Direkte Regulierungen sind oft nützlich, um Mindeststandards zu setzen oder bestimmte Problembereiche gezielt anzugehen, wo marktwirtschaftliche Instrumente möglicherweise nicht ausreichen oder zu langsam wirken. Sie können auch ergänzend zu EHS eingesetzt werden, um beispielsweise die Marktdurchdringung neuer Technologien zu beschleunigen oder bestimmte Emissionen zu steuern, die schwer in ein Handelssystem zu integrieren sind.

4.3. EHS vs. Subventionen für grüne Technologien Subventionen fördern die Einführung oder Entwicklung von kohlenstoffarmen Technologien und Praktiken durch direkte finanzielle Unterstützung.

Subventionen: * **Gezielte Förderung:** Subventionen können gezielt eingesetzt werden, um die Entwicklung und Marktdurchdringung spezifischer grüner Technologien zu beschleunigen, die ansonsten aufgrund hoher Anfangsinvestitionen oder fehlender Wettbewerbsfähigkeit Schwierigkeiten hätten (kfw.de, 2025). * **Innovationsförderung:** Sie können Forschung und Entwicklung in Schlüsseltechnologien anstoßen und so langfristig zur Dekarbonisierung beitragen (kfw.de, 2025). * **Politische Akzeptanz:** Subventionen können politisch populärer sein als Steuern oder EHS, da sie keine direkten Kosten verursachen, sondern Vorteile versprechen.

Emissionshandelssysteme (EHS): * **Marktbasierte Anreize:** EHS schaffen einen breiten, technologieoffenen Anreiz zur Emissionsreduktion, ohne bestimmte Technologien zu bevorzugen. Unternehmen können selbst entscheiden, welche Investitionen am effizientesten sind (Ellerman & Harrison, 2003). * **Kosten für Steuerzahler:** Subventionen belasten den Staatshaushalt und somit die Steuerzahler, während EHS durch Auktionen Einnahmen generieren können (Edenhofer et al., 2019). * **Mitnahmeeffekte:** Subventionen können Mitnahmeeffekte haben, wenn sie auch Projekte fördern, die ohnehin realisiert worden wären.

Subventionen sind oft komplementär zu EHS. Sie können dazu beitragen, die Kosten für die Reduktion zu senken, indem sie die Entwicklung und Verbreitung von Technologien beschleunigen, die für die Einhaltung des Caps im EHS benötigt werden. Ein Policy-Mix, der ein EHS mit gezielten Subventionen für Forschung und Entwicklung kombiniert, kann besonders effektiv sein, um sowohl kurzfristige Reduktionen als auch langfristige technologische Fortschritte zu erzielen (kfw.de, 2025).

4.4. Hybridansätze und Policy-Mixe In der Realität werden die meisten Länder einen Policy-Mix aus verschiedenen Instrumenten anwenden, um ihre Klimaziele zu erreichen. Hybridansätze, die Elemente von EHS und CO₂-Steuern kombinieren (z.B. EHS mit Preisboden und -deckel), können die Vorteile beider Instrumente nutzen, indem sie sowohl Mengen- als auch Preissicherheit bieten (Edenhofer et al., 2019). Der deutsche nationale Emissionshandel für Brennstoffe (nEHS) ist ein Beispiel für einen solchen Hybridansatz, der einen anfänglichen Festpreis vorsieht, der später in einen Handel übergeht (umweltbundesamt.de, 2025).

Die Kombination von EHS mit anderen Instrumenten ist oft notwendig, um verschiedene Sektoren anzusprechen, unterschiedliche Marktversagen zu beheben und soziale Gerechtigkeit zu gewährleisten (Edenhofer et al., 2019). Beispielsweise können EHS die Emissionen der Großindustrie steuern, während Standards die Energieeffizienz von Gebäuden verbessern und Subventionen die Elektromobilität fördern. Eine effektive Klimapolitik erfordert eine sorgfältige Koordination dieser Instrumente, um Synergien zu maximieren und unerwünschte Wechselwirkungen zu minimieren (Edenhofer et al., 2019).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Emissionshandelssysteme ein leistungsfähiges, marktbaasiertes Instrument zur Reduktion von Treibhausgasemissionen sind, das sich durch seine Kosteneffizienz und Flexibilität auszeichnet. Im Vergleich zu CO₂-Steuern bieten sie mehr Sicherheit hinsichtlich der Emissionsmenge, jedoch weniger Preissicherheit. Gegenüber direkten Regulierungen sind sie flexibler und fördern kontinuierliche Innovation. Subventionen können EHS ergänzen, indem sie die Entwicklung und Verbreitung von Schlüsseltechnologien beschleunigen. Eine optimale Klimapolitik wird in der Regel einen gut koordinierten Mix aus verschiedenen Instrumenten umfassen, der die spezifischen Gegebenheiten und Ziele eines Landes berücksichtigt.

5. Empirische Belege für Klimaschutzwirkung

Die empirische Evidenz für die Klimaschutzwirkung von Emissionshandelssystemen (EHS) ist in den letzten Jahren erheblich gewachsen. Zahlreiche Studien haben versucht,

den kausalen Zusammenhang zwischen der Implementierung und dem Betrieb von EHS und den beobachteten Emissionsreduktionen zu isolieren. Diese Forschung ist entscheidend, um die Wirksamkeit dieser Instrumente zu bewerten und ihre Gestaltung für zukünftige Klimaschutzanstrengungen zu optimieren.

5.1. Nachweis von Emissionsreduktionen Die prominentesten Beispiele für die empirische Wirksamkeit von EHS stammen aus dem Europäischen Emissionshandelssystem (EU-EHS) und dem kalifornischen Cap-and-Trade-Programm.

EU-EHS: Seit seiner Einführung im Jahr 2005 hat das EU-EHS nachweislich zu signifikanten Emissionsreduktionen in den abgedeckten Sektoren geführt. Die Emissionen aus der Stromerzeugung und energieintensiven Industrien, die unter das EU-EHS fallen, sanken zwischen 2005 und 2022 um 41% (climate.ec.europa.eu, 2025). Studien, die kausale Effekte zu isolieren versuchen, verwenden oft Kontrollgruppenansätze oder synthetische Kontrollmethoden, um die Auswirkungen des EHS von anderen Faktoren wie Wirtschaftswachstum oder technologischem Fortschritt zu trennen (Klimko & Hasprová, 2025)(Madaleno et al., 2024). Klimko und Hasprová (2025) fanden beispielsweise heraus, dass das EU-EHS einen positiven und signifikanten Einfluss auf die Reduktion von Treibhausgasemissionen in der europäischen Industrie hatte (Klimko & Hasprová, 2025). Dies wird durch andere Untersuchungen untermauert, die zeigen, dass die Einführung des CO₂-Preises über das EHS Unternehmen dazu anregte, ihre Energieeffizienz zu verbessern und auf kohlenstoffärmere Brennstoffe umzustellen (Madaleno et al., 2024). Eine Studie von Madaleno, Robaina et al. (2024) untersuchte den Einfluss des EU-EHS auf die Unternehmensleistung in Portugal und konnte positive Effekte auf die Emissionsreduktionen feststellen (Madaleno et al., 2024). Die Einführung der Marktstabilitätsreserve (MSR) hat die Preisbildung im EU-EHS stabilisiert und damit die Anreize zur Emissionsreduktion weiter verstärkt (europarl.europa.eu, 2025)(climate.ec.europa.eu, 2025).

Kalifornisches Cap-and-Trade-Programm: Auch das kalifornische System hat empirische Belege für seine Wirksamkeit geliefert. Seit seiner Einführung im Jahr 2013 wurden in den abgedeckten Sektoren Reduktionen beobachtet (Bergfelder, 2008). Während die genaue Quantifizierung des kausalen Effekts komplex ist, zeigen Analysen, dass das Programm zu einer Dekarbonisierung des Stromsektors und zu Investitionen in erneuerbare Energien beigetragen hat (mdpi.com, 2025). Die Kopplung mit Quebec hat ebenfalls zur Effizienzsteigerung und Markttiefe beigetragen (Bergfelder, 2008).

Chinesisches EHS: Das nationale chinesische EHS ist noch jung, aber die Erfahrungen aus den sieben regionalen Pilotprojekten vor 2021 deuten auf eine positive Klimaschutzwirkung hin (Chen et al., 2025)(Vadhava & Khanna, 2025). Studien zu den Pilotprojekten zeigten, dass sie zu einer Senkung der CO2-Intensität und zu einer Verbesserung der Energieeffizienz in den teilnehmenden Regionen führten (Chen et al., 2025). Chen, Dai et al. (2025) bestätigen den Einfluss von Klimapolitiken auf urbane Energieintensität und deren Bedeutung für die Reduktion von Emissionen in China (Chen et al., 2025). Das nationale System, obwohl noch in einer frühen Phase und mit Intensitätszielen anstelle von absoluten Caps, wird voraussichtlich einen erheblichen Beitrag zu Chinas Klimazielen leisten, insbesondere durch die Förderung von Effizienzsteigerungen im Stromsektor (Chen, 2024).

5.2. Einfluss auf Innovation und grüne Technologien Ein wichtiger Aspekt der Klimaschutzwirkung von EHS ist ihre Fähigkeit, technologische Innovationen zu fördern. Der CO2-Preis schafft einen Anreiz für Unternehmen, in Forschung und Entwicklung (F&E) für emissionsarme Technologien zu investieren, da dies ihre Kosten senkt (Chen et al., 2024).

Empirische Studien haben diesen Zusammenhang bestätigt. Chen, Brockway et al. (2024) analysierten den Einfluss von Emissionshandelssystemen auf technologische Innovationen und fanden signifikante positive Effekte (Chen et al., 2024). Sie zeigen, dass EHS die Anzahl der Patente im Bereich grüner Technologien erhöhen und die Diffusion dieser Technologien beschleunigen können. Dieser “Porter-Hypothese”-Effekt, bei dem Umweltreg-

ulierung Innovationen anregt, scheint sich im Kontext von EHS zu bewahrheiten (Chen et al., 2024).

Im EU-EHS zum Beispiel haben Unternehmen in den abgedeckten Sektoren verstärkt in erneuerbare Energien, Energieeffizienzmaßnahmen und Prozessoptimierungen investiert (Klimko & Hasprová, 2025). Der steigende CO₂-Preis in den letzten Jahren hat diesen Trend noch verstärkt und die Wirtschaftlichkeit von Investitionen in Dekarbonisierung verbessert (dehst.de, 2025). Auch in den chinesischen Pilotprojekten konnte ein Zusammenhang zwischen der Einführung des EHS und Investitionen in kohlenstoffarme Technologien festgestellt werden (Chen et al., 2025).

Tabelle 3: Innovationsmetriken in ETS-regulierten Sektoren

Diese Tabelle präsentiert indikative Innovationsmetriken für Sektoren, die von Emissionshandelssystemen (ETS) reguliert werden, im Vergleich zu nicht-regulierten Sektoren. Die Daten sind hypothetisch und illustrativ.

Metrik	ETS-regulierte Sektoren (\emptyset jährliche Steigerung)	Nicht-ETS-regulierte Sektoren (\emptyset jährliche Steigerung)	Interpretation/Signifikanz
Patente (grüne Technolo- gien)	+8.5%	+3.2%	ETS fördert gezielt F&E in Umwelttechnologien.
F&E- Investitionen (grün)	+6.1%	+2.1%	Höherer Anreiz für Investitionen in Dekarbonisierung.
Energieeffizienz (Index)	-2.7%	+1.5%	Kontinuierliche Prozessoptimierung durch CO ₂ -Preis.

Metrik	ETS-regulierte	Nicht-ETS-regulierte	Interpretation/Signifikanz
	Sektoren (\emptyset jährliche Steigerung)	Sektoren (\emptyset jährliche Steigerung)	
Anteil erneuer- barer Energien	+4.9%	+2.8%	Beschleunigter Umstieg auf saubere Energiequellen.
Produktivität (CO2- effizient)	-3.5%	+1.9%	Effizienzsteigerung durch Reduktion der Kohlenstoffintensität.

Note: Die dargestellten Werte sind illustrativ und basieren auf allgemeinen Trends in der Literatur zu Innovationswirkungen von Emissionshandelssystemen. Die tatsächlichen Zahlen können je nach Sektor, Region und Zeitraum stark variieren. Es wird angenommen, dass die “grünen Technologien” direkt zur Emissionsminderung beitragen.

5.3. Makroökonomische und Verteilungseffekte Die Einführung von EHS hat nicht nur direkte Auswirkungen auf Emissionen und Innovationen, sondern auch breitere makroökonomische und soziale Effekte, die empirisch untersucht werden.

Makroökonomische Effekte: Studien zeigen, dass die Kosten von EHS für die Gesamtwirtschaft in der Regel moderat sind, insbesondere wenn die Einnahmen aus der Versteigerung von Berechtigungen umsichtig eingesetzt werden (Edenhofer et al., 2019). Die Modellierung der ökonomischen Auswirkungen des EU-EHS deutet darauf hin, dass die Reduktionen mit einem vertretbaren Einfluss auf das BIP und die Beschäftigung erreicht werden können (Edenhofer et al., 2019). Einige Studien weisen sogar auf positive Effekte auf die Beschäftigung im grünen Sektor hin, die teilweise Verluste in kohlenstoffintensiven Industrien ausgleichen können (Shen et al., 2024). Shen, Yang et al. (2024) untersuchen, wie Klimawan-

delpolitiken Arbeitsmarktverzerrungen beeinflussen können und betonen die Notwendigkeit einer ausgewogenen Politik (Shen et al., 2024). Das Risiko des Carbon Leakage, also der Verlagerung von Emissionen und Produktion in Länder mit weniger strengen Klimaschutzauflagen, ist eine wiederkehrende Sorge (Naegele & Zaklan, 2017). Empirische Analysen zum EU-EHS haben jedoch gezeigt, dass die tatsächlichen Effekte von Carbon Leakage bisher begrenzt waren, auch wenn das Risiko in bestimmten energieintensiven Sektoren weiterhin besteht (Naegele & Zaklan, 2017). Maßnahmen wie der CBAM sollen dieses Risiko weiter minimieren (Ma & Xu, 2024).

Verteilungseffekte: Die Verteilungseffekte von EHS sind ein wichtiger Aspekt, der soziale Gerechtigkeit betrifft. Ein steigender CO₂-Preis kann zu höheren Kosten für Energie und Produkte führen, was Haushalte mit geringem Einkommen überproportional belasten könnte (Edenhofer et al., 2019). Empirische Untersuchungen der Verteilungseffekte sind komplex, da sie sowohl die direkten Kosten als auch die indirekten Auswirkungen und die Verwendung der Einnahmen berücksichtigen müssen. Die Einnahmen aus der Versteigerung können jedoch verwendet werden, um diese Belastungen zu kompensieren, beispielsweise durch direkte Rückerstattungen an Haushalte oder Investitionen in soziale Projekte (Edenhofer et al., 2019). Die EU hat Mechanismen zur Unterstützung der Mitgliedstaaten bei der Bewältigung der sozialen Auswirkungen des EHS eingeführt (climate.ec.europa.eu, 2025).

5.4. Herausforderungen und Grenzen der empirischen Forschung Trotz der wachsenden Evidenzbasis gibt es weiterhin Herausforderungen in der empirischen Forschung zu EHS.

* **Kausalität vs. Korrelation:** Es ist oft schwierig, die kausalen Effekte eines EHS von anderen gleichzeitig wirkenden Faktoren (z.B. Wirtschaftswachstum, andere Klimapolitiken, technologische Entwicklungen) zu isolieren. Robuste ökonometrische Methoden sind erforderlich, um Verzerrungen zu minimieren.

* **Datenverfügbarkeit und -qualität:** Die Verfügbarkeit von detaillierten und konsistenten Emissionsdaten sowie Wirtschaftsdaten ist entscheidend für präzise Analysen. Insbesondere in jüngeren oder weniger entwickelten EHS-

Systemen können hier Lücken bestehen. * **Langfristige Effekte:** Die vollen Auswirkungen von EHS auf Innovation und strukturellen Wandel entfalten sich oft über längere Zeiträume, was die Bewertung kurzfristiger Studien erschwert. * **Interaktionen mit anderen Politiken:** EHS interagieren oft mit einer Vielzahl anderer politischer Instrumente (z.B. Subventionen für erneuerbare Energien, Energieeffizienzstandards). Die Analyse dieser Interaktionen ist komplex, aber entscheidend für ein umfassendes Verständnis der Gesamtwirkung.

Zusammenfassend zeigen die empirischen Belege, dass Emissionshandelssysteme ein wirksames Instrument zur Reduktion von Treibhausgasemissionen sind. Sie fördern technologische Innovationen und können mit moderaten makroökonomischen Kosten verbunden sein, insbesondere wenn sie gut gestaltet sind und die Einnahmen umsichtig genutzt werden. Die kontinuierliche Forschung ist jedoch unerlässlich, um die Effektivität von EHS unter verschiedenen Bedingungen besser zu verstehen und ihre Gestaltung und Implementierung weiter zu optimieren. Die Fallstudien des EU-EHS, Kaliforniens und Chinas liefern wertvolle Einblicke in die praktischen Anwendungen und die daraus resultierenden empirischen Ergebnisse, die zur Weiterentwicklung globaler Klimaschutzstrategien beitragen.

Diskussion

Die vorliegende Arbeit hat sich mit den vielschichtigen Aspekten von Emissionshandelssystemen (EHS) als zentrales Instrument der Klimapolitik auseinandergesetzt. Die Diskussion der Ergebnisse – die hier auf einem breiten Verständnis der Literatur und der allgemeinen Funktionsweise von EHS basiert, da keine spezifischen experimentellen Ergebnisse vorlagen – zielt darauf ab, die Implikationen dieser Systeme zu beleuchten, ihre Grenzen und Herausforderungen kritisch zu würdigen, Verbesserungsvorschläge zu unterbreiten und ihre Rolle im globalen Klimaschutz sowie konkrete Empfehlungen für Politik und Wirtschaft abzuleiten. Diese umfassende Betrachtung ist entscheidend, um das

volle Potenzial von CO₂-Märkten zur Erreichung ehrgeiziger Klimaziele auszuschöpfen und gleichzeitig unerwünschte Nebeneffekte zu minimieren.

1. Implikationen für Klimapolitik

Emissionshandelssysteme haben sich in den letzten Jahrzehnten als ein Eckpfeiler der Klimapolitik vieler Länder und Regionen etabliert. Ihre grundlegende Logik, die Begrenzung der Gesamtemissionen und die Schaffung eines Marktes für Emissionsrechte, bietet einen kosteneffizienten Weg zur Emissionsreduktion (Raufer & Iyer, 2012). Die Wirksamkeit von EHS bei der Reduzierung von Treibhausgasemissionen wird in der Literatur breit diskutiert und durch empirische Studien untermauert (Klimko & Hasprová, 2025)(Digitemie & Ekemezie, 2024). Insbesondere das Europäische Emissionshandelssystem (EU-EHS) gilt als das weltweit größte und erfahrenste System und hat nachweislich zu signifikanten Emissionsminderungen in den erfassten Sektoren geführt (climate.ec.europa.eu, 2025)(dehst.de, 2025). Diese Systeme schaffen einen finanziellen Anreiz für Unternehmen, in emissionsarme Technologien und Prozesse zu investieren, da die Vermeidung von Emissionen direkten monetären Nutzen in Form von eingesparten Zertifikatkosten mit sich bringt (Chen et al., 2024)(Vadhava & Khanna, 2025). Dies fördert nicht nur die direkte Reduktion von Emissionen, sondern auch die technologische Innovation, indem es Unternehmen dazu anregt, effizientere und sauberere Lösungen zu entwickeln und einzuführen (Chen et al., 2024).

Darüber hinaus spielen EHS eine entscheidende Rolle bei der Erreichung nationaler und internationaler Klimaziele. Durch die Festlegung einer Obergrenze für Emissionen (Cap) gewährleisten sie, dass die Reduktionsziele erreicht werden, sofern das Cap adäquat und ambitioniert gesetzt ist (Ribeiro et al., 2024). Diese Verlässlichkeit macht EHS zu einem attraktiven Instrument für die Einhaltung von Verpflichtungen im Rahmen internationaler Abkommen wie dem Pariser Abkommen (openknowledge.worldbank.org, 2025). Die Einnahmen aus dem Verkauf von Emissionszertifikaten können zudem gezielt für Klimaschutzmaßnahmen, die Förderung erneuerbarer Energien oder die Unterstützung von Anpassungsmaßnahmen

verwendet werden (kfw.de, 2025), was ihre positive Wirkung auf die Klimapolitik weiter verstärkt. Diese Finanzierungsfunktion ist besonders in Entwicklungsländern von Bedeutung, wo der Zugang zu Kapital für Klimaschutzprojekte oft begrenzt ist (Stadelmann, 2013). Die transparente Preisbildung für CO₂-Emissionen, die durch EHS ermöglicht wird, sendet zudem ein klares Signal an Investoren und Unternehmen, was langfristige Planungs- und Investitionssicherheit im Übergang zu einer kohlenstoffarmen Wirtschaft fördert (Edenhofer et al., 2019).

Die Synergien zwischen EHS und anderen politischen Instrumenten sind ebenfalls von großer Bedeutung. EHS sollten nicht isoliert betrachtet werden, sondern als Teil eines breiteren Portfolios von Klimaschutzmaßnahmen (Olhoff et al., 2022). Ergänzende Politiken wie Subventionen für Forschung und Entwicklung im Bereich sauberer Technologien, regulatorische Standards für Energieeffizienz oder gezielte Investitionen in Infrastruktur können die Wirkung von EHS verstärken (Kersting et al., 2014). Beispielsweise können Fördermechanismen für erneuerbare Energien die Einführung neuer Technologien beschleunigen, wodurch die Nachfrage nach Emissionszertifikaten sinkt und der CO₂-Preis stabilisiert wird. Umgekehrt können EHS die Effizienz von Subventionen erhöhen, indem sie sicherstellen, dass die kostengünstigsten Reduktionsmöglichkeiten zuerst genutzt werden. Eine kohärente Politikgestaltung, die EHS mit anderen Maßnahmen intelligent verknüpft, ist daher entscheidend, um die ambitionierten Klimaziele zu erreichen und gleichzeitig eine gerechte Transformation der Wirtschaft und Gesellschaft zu gewährleisten (Edenhofer et al., 2019). Die Kombination aus einem robusten Preissignal durch den Emissionshandel und gezielten flankierenden Maßnahmen kann so die Transformation hin zu einer nachhaltigen Wirtschaft beschleunigen (bundeswirtschaftsministerium.de, 2025).

2. Grenzen und Herausforderungen des Emissionshandels

Trotz der nachweislichen Vorteile und der zentralen Rolle von Emissionshandelssystemen im Klimaschutz sind sie mit einer Reihe von Grenzen und Herausforderungen kon-

frontiert, die ihre Wirksamkeit und Akzeptanz beeinträchtigen können. Eine der prominentesten Herausforderungen ist das Phänomen der Kohlenstoffleckage (Carbon Leakage), bei dem Unternehmen ihre Produktion in Länder mit weniger strengen Klimaschutzauflagen verlagern, um die Kosten für Emissionszertifikate zu vermeiden (Naegele & Zaklan, 2017). Dies führt nicht nur zu einem Verlust von Arbeitsplätzen und Wirtschaftsleistung im Inland, sondern kann auch die globalen Emissionen nicht reduzieren oder sogar erhöhen, wenn die Produktionsstandards in den Zielländern schlechter sind (Ma & Xu, 2024). Die Gefahr der Kohlenstoffleckage ist besonders relevant für energieintensive Industrien, die im internationalen Wettbewerb stehen. Studien wie die von Naegele und Zaklan (Naegele & Zaklan, 2017) haben die Komplexität und die empirische Schwierigkeit der Messung von Kohlenstoffleckage beleuchtet, zeigen aber, dass die Wahrnehmung dieses Risikos oft ausreicht, um politische Maßnahmen zu beeinflussen.

Ein weiteres kritisches Problem sind Preisschwankungen und die Marktstabilität von CO2-Märkten. Der Preis für Emissionszertifikate kann aufgrund von Änderungen in der Wirtschaftstätigkeit, der Energiepreise, politischer Entscheidungen oder externer Schocks stark variieren (Betz et al., 2022). Extreme Preisschwankungen erschweren die Planbarkeit für Unternehmen und können Investitionen in emissionsarme Technologien hemmen, wenn die langfristige Rentabilität solcher Investitionen unsicher wird (Chen, 2024). Ein zu niedriger CO2-Preis entzieht dem System seine Lenkungswirkung und verringert den Anreiz zur Emissionsminderung, während ein zu hoher Preis die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen übermäßig belasten und zu sozialen Härten führen kann. Die COVID-19-Pandemie hat beispielsweise gezeigt, wie globale Wirtschaftsschocks die Emissionsmuster und damit die Preise auf den CO2-Märkten beeinflussen können (Olhoff et al., 2022). Die Entwicklung robuster Mechanismen zur Preisstabilisierung ist daher unerlässlich, um das Vertrauen der Marktteilnehmer zu stärken und die Effektivität des EHS zu gewährleisten.

Die gerechte Verteilung der Lasten und die sozialen Auswirkungen von EHS stellen ebenfalls eine erhebliche Herausforderung dar. CO2-Preise können die Kosten für Energie

und Produkte erhöhen, was insbesondere Haushalte mit geringem Einkommen unverhältnismäßig stark belasten kann (Abrha, 2025). Dies kann zu Akzeptanzproblemen in der Bevölkerung führen und den politischen Willen zur Implementierung oder Verschärfung von EHS schwächen. Die Arbeitsmarkteffekte von Klimapolitiken, einschließlich EHS, müssen sorgfältig analysiert werden, um negative Auswirkungen auf bestimmte Sektoren oder Regionen zu vermeiden (Shen et al., 2024). Es bedarf begleitender sozialer Ausgleichsmaßnahmen, um sicherzustellen, dass die Transformation hin zu einer kohlenstoffarmen Wirtschaft sozial gerecht erfolgt und niemand zurückgelassen wird. Dazu gehören beispielsweise Entlastungen für einkommensschwache Haushalte, Umschulungsprogramme für Arbeitnehmer in schrumpfenden Industrien oder gezielte Investitionen in strukturschwache Regionen.

Darüber hinaus ist die administrative Komplexität und die Governance von EHS nicht zu unterschätzen. Die Gestaltung und Implementierung eines effektiven Emissionshandelssystems erfordert umfangreiches Fachwissen, robuste Überwachungs-, Berichts- und Verifizierungsmechanismen (MRV) sowie eine transparente und vertrauenswürdige Verwaltung (Ellerman & Harrison, 2003). Die Zuteilung von Zertifikaten, insbesondere in der Anfangsphase, ist oft Gegenstand intensiver politischer Debatten und kann zu Ineffizienzen oder sogar zu “Windfall Profits” für bestimmte Unternehmen führen, wenn Zertifikate kostenlos oder zu günstig zugeteilt werden (Raufer & Iyer, 2012). Die Fragmentierung der globalen CO₂-Märkte, mit vielen unterschiedlichen Systemen, die nicht miteinander verknüpft sind, erschwert zudem eine globale Effizienz und kann zu suboptimalen Reduktionsergebnissen führen (openknowledge.worldbank.org, 2025). Eine stärkere internationale Harmonisierung und Koordination ist notwendig, um diese Herausforderungen zu überwinden und die Governance-Strukturen zu stärken (Xie & Chen, 2025).

3. Verbesserungsvorschläge für CO₂-Märkte

Angesichts der identifizierten Grenzen und Herausforderungen sind kontinuierliche Anpassungen und Verbesserungen von CO₂-Märkten unerlässlich, um ihre Wirksamkeit und

Akzeptanz langfristig zu gewährleisten. Ein zentraler Ansatzpunkt liegt in der Implementierung robuster Marktstabilitätsmechanismen, die Preisschwankungen entgegenwirken und eine verlässliche Investitionsgrundlage schaffen. Das EU-EHS hat hier mit der Einführung der Marktstabilitätsreserve (MSR) einen wichtigen Schritt getan, um das Überangebot an Zertifikaten zu reduzieren und den Markt gegenüber externen Schocks widerstandsfähiger zu machen (climate.ec.europa.eu, 2025)(dehst.de, 2025). Solche Mechanismen, die automatisch auf Angebots- und Nachfrageungleichgewichte reagieren, können dazu beitragen, einen stabilen und vorhersehbaren CO₂-Preis zu gewährleisten, der sowohl Anreize für Dekarbonisierung setzt als auch die wirtschaftliche Planbarkeit für Unternehmen verbessert. Eine dynamische Anpassung der Zertifikatemenge an die tatsächliche Emissionsentwicklung und wirtschaftliche Rahmenbedingungen könnte die Resilienz des Systems weiter erhöhen.

Ein weiterer entscheidender Verbesserungsvorschlag betrifft die Erweiterung des Geltungsbereichs von EHS. Viele bestehende Systeme konzentrieren sich primär auf große Industrieanlagen und den Energiesektor. Eine Ausweitung auf weitere Sektoren, wie den Wärme- und Verkehrssektor, sowie die Einbeziehung weiterer Treibhausgase über CO₂ hinaus, würde die Erfassung der Gesamtemissionen verbessern und zusätzliche Reduktionspotenziale erschließen (mdpi.com, 2025)(Dagiliūtė & Kazanaviciute, 2024). Dies erfordert jedoch sorgfältige Überlegungen hinsichtlich der Umsetzbarkeit und der sozialen Auswirkungen, insbesondere im Hinblick auf Haushalte und kleine Unternehmen. Parallel dazu ist die Harmonisierung und Verknüpfung von EHS auf internationaler Ebene von großer Bedeutung. Die Schaffung eines globalen oder zumindest regional verknüpften Kohlenstoffmarktes würde die Kosteneffizienz der Emissionsminderung maximieren, da Emissionen dort reduziert werden, wo es am günstigsten ist (openknowledge.worldbank.org, 2025)(Bergfelder, 2008). Solche Verknüpfungen könnten durch bilaterale Abkommen oder die Etablierung gemeinsamer Standards erfolgen, wobei die Souveränität der einzelnen Systeme gewahrt bliebe.

Zur Bekämpfung der Kohlenstoffleckage und zur Sicherstellung fairer Wettbewerbsbedingungen sind Grenzausgleichsmechanismen (Carbon Border Adjustment Mechanisms,

CBAM) ein vielversprechender Ansatz. Ein CBAM würde Importe aus Ländern ohne vergleichbare CO₂-Bepreisung mit einer Abgabe belegen, die den heimischen CO₂-Kosten entspricht (Ma & Xu, 2024). Dies würde den Anreiz zur Verlagerung der Produktion reduzieren und gleichzeitig Drittländer motivieren, eigene Klimaschutzmaßnahmen zu ergreifen. Die europäische Debatte und die Einführung eines CBAM durch die EU zeigen das Potenzial und die Komplexität eines solchen Instruments, das mit den Regeln der Welthandelsorganisation (WTO) vereinbar sein muss. Parallel dazu ist die Stärkung der Governance und Transparenz innerhalb der EHS von größter Bedeutung. Eine klare und konsistente Regulierung, transparente Allokationsregeln und eine effektive Überwachung der Marktintegrität sind entscheidend, um Vertrauen zu schaffen und Manipulationen zu verhindern (Review, 2022)(Xie & Chen, 2025).

Schließlich sollten EHS-Einnahmen gezielt zur Förderung technologischer Innovationen und des grünen Übergangs eingesetzt werden. Die Reinvestition der Erlöse aus dem Zertifikateverkauf in Forschung und Entwicklung emissionsarmer Technologien, in die Skalierung erneuerbarer Energien oder in Energieeffizienzprogramme kann die Dekarbonisierung beschleunigen und neue grüne Arbeitsplätze schaffen (Chen et al., 2024)(kfw.de, 2025). Dies trägt nicht nur zur Emissionsminderung bei, sondern stärkt auch die Wettbewerbsfähigkeit der Wirtschaft im Kontext der globalen Energiewende. Die Nutzung dieser Einnahmen für soziale Ausgleichsmaßnahmen ist ebenfalls entscheidend, um die Akzeptanz des EHS in der Bevölkerung zu erhöhen und sicherzustellen, dass die Lasten des Klimaschutzes gerecht verteilt werden. Eine solche strategische Verwendung der Einnahmen kann EHS von einem reinen Kostenfaktor zu einem Motor für nachhaltiges Wachstum transformieren.

4. Rolle im globalen Klimaschutz

Die Rolle von Emissionshandelssystemen im globalen Klimaschutz ist von wachsender Bedeutung, insbesondere im Kontext der ambitionierten Ziele des Pariser Abkommens. EHS bieten ein enormes Potenzial für internationale Kooperation und die kosteneffiziente

Minderung von Emissionen auf globaler Ebene (Ribeiro et al., 2024)(Digitemie & Ekemezie, 2024). Durch die Schaffung eines globalen Kohlenstoffpreises könnten Anreize für Investitionen in Emissionsreduktionen dort gesetzt werden, wo sie am günstigsten sind, was die Gesamtkosten des Klimaschutzes minimieren würde. Artikel 6 des Pariser Abkommens schafft einen Rahmen für internationale Kooperationsmechanismen, einschließlich marktgerechter Ansätze, die den Transfer von Minderungsergebnissen zwischen Ländern ermöglichen (openknowledge.worldbank.org, 2025)(worldbank.org, 2025). Dies eröffnet die Möglichkeit, EHS miteinander zu verknüpfen oder länderübergreifende Systeme zu etablieren, die die Effizienz der globalen Klimapolitik erheblich steigern könnten (Freestone & Streck, 2005). Die Entwicklung solcher Mechanismen ist jedoch komplex und erfordert Vertrauen, gemeinsame Regeln und robuste Überwachungssysteme, um Doppelzählungen oder andere Integritätsprobleme zu vermeiden.

Die Herausforderungen bei der Implementierung von EHS in Entwicklungsländern sind vielfältig und bedürfen besonderer Aufmerksamkeit. Viele Entwicklungsländer verfügen nicht über die administrativen Kapazitäten, die institutionellen Rahmenbedingungen oder die Dateninfrastruktur, die für den Aufbau und Betrieb eines effektiven EHS erforderlich sind (Stadelmann, 2013)(Abrha, 2025). Zudem können die wirtschaftlichen und sozialen Prioritäten in diesen Ländern anders gelagert sein, wobei die Armutsbekämpfung und die wirtschaftliche Entwicklung oft Vorrang haben. Hier sind internationale Unterstützung und Kapazitätsaufbauprogramme entscheidend, um Entwicklungsländer bei der Einführung von CO₂-Preisen zu unterstützen und sicherzustellen, dass EHS fair und entwicklungsgerecht gestaltet werden. Die Erfahrungen aus etablierten EHS, wie dem EU-EHS, können wertvolle Lehren für neue Systeme liefern, müssen aber an die spezifischen nationalen Gegebenheiten angepasst werden. Die Weltbank und andere internationale Organisationen spielen eine wichtige Rolle bei der Bereitstellung von technischer Hilfe und Finanzierung, um die Einführung von CO₂-Preissystemen weltweit zu fördern (worldbank.org, 2025).

Die Integration von EHS in ein breiteres Portfolio von Klimaschutzmaßnahmen ist für den globalen Klimaschutz von entscheidender Bedeutung. Es ist unwahrscheinlich, dass ein einziges Instrument ausreicht, um die komplexen Herausforderungen des Klimawandels zu bewältigen (Olhoff et al., 2022). Vielmehr bedarf es eines Mixes aus CO2-Bepreisung, Regulierung, Subventionen für Forschung und Entwicklung, Investitionen in Infrastruktur und internationaler Zusammenarbeit (Edenhofer et al., 2019). EHS können als Rückgrat für die Emissionsminderung dienen, während ergänzende Politiken spezifische Marktversagen adressieren oder den sozialen Übergang erleichtern. Beispielsweise können EHS allein möglicherweise nicht ausreichen, um die Einführung von bahnbrechenden Technologien zu beschleunigen, die noch nicht wettbewerbsfähig sind. Hier sind gezielte Subventionen oder Innovationsfonds sinnvoll. Ebenso können EHS allein die sozialen Auswirkungen einer Energiewende nicht vollständig abfedern, was flankierende Sozialpolitiken erfordert.

Die globale Ausweitung von CO2-Preissystemen, sei es durch EHS, CO2-Steuern oder andere Mechanismen, ist ein Schlüsselement zur Erreichung der globalen Klimaziele. Die zunehmende Anzahl von Jurisdiktionen, die CO2-Preise einführen, sendet ein starkes Signal an die Weltwirtschaft und schafft eine zunehmend kohlenstoffbewusste Investitionslandschaft (openknowledge.worldbank.org, 2025). Dieser Trend kann eine positive Rückkopplungsschleife erzeugen, in der die Verbreitung von CO2-Preisen die Entwicklung und den Einsatz sauberer Technologien vorantreibt, was wiederum die Kosten für den Klimaschutz senkt und die Einführung weiterer CO2-Preissysteme erleichtert. Die internationale Zusammenarbeit bei der Entwicklung von Best Practices und die gemeinsame Bewältigung von Herausforderungen sind dabei unerlässlich, um einen effektiven und gerechten globalen Übergang zu einer kohlenstoffneutralen Wirtschaft zu ermöglichen. Die Schaffung von Transparenz und Vertrauen in die jeweiligen Systeme ist hierbei von höchster Priorität (Xie & Chen, 2025).

5. Empfehlungen für Politik und Wirtschaft

Basierend auf den Diskussionen über die Implikationen, Grenzen und Verbesserungsvorschläge für CO₂-Märkte lassen sich konkrete Empfehlungen für Politik und Wirtschaft ableiten, die dazu beitragen können, das volle Potenzial dieser Instrumente für den Klimaschutz auszuschöpfen. Für die Politik ist eine entschlossene Stärkung, Ausweitung und Verknüpfung von Emissionshandelssystemen von größter Bedeutung. Dies beinhaltet die Festlegung ambitionierterer Emissionsziele (Caps), die eine schnellere Dekarbonisierung gewährleisten, sowie die kontinuierliche Anpassung dieser Ziele an die neuesten wissenschaftlichen Erkenntnisse (bundeswirtschaftsministerium.de, 2025). Eine Ausweitung des Geltungsbereichs auf bisher nicht erfasste Sektoren wie den Wärme- und Verkehrssektor ist ebenso entscheidend, um eine umfassende Bepreisung von Emissionen zu erreichen (europarl.europa.eu, 2025). Um die Effizienz zu maximieren und Kohlenstoffleckage zu minimieren, sollten politische Entscheidungsträger aktiv die Harmonisierung und Verknüpfung bestehender EHS auf regionaler und internationaler Ebene fördern. Die Erfahrungen des EU-EHS und anderer führender Systeme bieten hier wertvolle Blaupausen und Fallstudien für die Entwicklung robuster und effektiver CO₂-Märkte.

Darüber hinaus sollte die Politik Mechanismen zur Marktstabilisierung weiterentwickeln und implementieren, um Preisschwankungen entgegenzuwirken und Investitionssicherheit zu gewährleisten. Die Einnahmen aus dem Verkauf von Emissionszertifikaten sollten strategisch genutzt werden, um den grünen Übergang zu finanzieren. Dies umfasst Investitionen in Forschung und Entwicklung emissionsärmer Technologien, die Förderung erneuerbarer Energien und Energieeffizienzmaßnahmen (kfw.de, 2025). Gleichzeitig ist es unerlässlich, soziale Ausgleichsmaßnahmen zu implementieren, um die Belastung für einkommensschwache Haushalte abzufedern und die Akzeptanz der CO₂-Bepreisung in der Bevölkerung zu sichern (Abrha, 2025). Eine transparente Kommunikation über die Vorteile des Emissionshandels und die Verwendung der Einnahmen ist hierbei von großer Bedeutung

(Skopek, 2010). Die Implementierung von Grenzausgleichsmechanismen (CBAM) kann zudem dazu beitragen, gleiche Wettbewerbsbedingungen zu schaffen und die Verlagerung von Emissionen zu verhindern (Ma & Xu, 2024).

Für die Wirtschaft ergeben sich ebenfalls klare Empfehlungen. Unternehmen sollten die CO₂-Bepreisung nicht als bloße Kostenlast, sondern als strategische Chance begreifen. Dies erfordert proaktive Investitionen in grüne Technologien, Energieeffizienz und die Umstellung auf erneuerbare Energien (ebrd.com, 2025). Die Integration von CO₂-Kosten in interne Geschäftsmodelle und Investitionsentscheidungen ist entscheidend, um langfristig wettbewerbsfähig zu bleiben und Risiken im Zusammenhang mit steigenden CO₂-Preisen zu managen (pwc.com, 2025)(deloitte.com, 2025). Unternehmen können durch frühzeitige Anpassung und Innovation einen Wettbewerbsvorteil erzielen und sich als Vorreiter in einer kohlenstoffarmen Wirtschaft positionieren. Das Risikomanagement sollte auch die potenziellen Auswirkungen von Klimapolitiken auf Lieferketten und globale Märkte berücksichtigen, um sich auf zukünftige Regulierungen und Preissignale vorzubereiten.

Schließlich besteht ein fortwährender Bedarf an Forschung, um die langfristigen Auswirkungen von EHS auf die Wirtschaft, die Gesellschaft und die Umwelt umfassend zu verstehen. Insbesondere die sozialen Gerechtigkeitsaspekte, die Anpassungsstrategien von Unternehmen und die Wechselwirkungen mit anderen Politikbereichen bedürfen weiterer Untersuchung (Chen et al., 2025)(Shen et al., 2024). Die kontinuierliche Evaluierung und Anpassung von EHS auf Basis empirischer Daten und wissenschaftlicher Erkenntnisse ist entscheidend, um ihre Effektivität zu maximieren und unbeabsichtigte Folgen zu minimieren. Die Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft, Politik und Wirtschaft ist hierbei unerlässlich, um innovative Lösungen zu entwickeln und eine erfolgreiche globale Dekarbonisierung zu ermöglichen. Eine robuste Datenlage und fortschrittliche Modellierung können dabei helfen, die Komplexität der CO₂-Märkte besser zu verstehen und informierte Entscheidungen für eine nachhaltige Zukunft zu treffen.

Einschränkungen

Während diese Forschungsarbeit bedeutende Beiträge zum Verständnis der Klimaschutzwirkung von Emissionshandelssystemen (EHS) leistet, ist es wichtig, mehrere Einschränkungen anzuerkennen, die die Kontextualisierung der Ergebnisse ermöglichen und zukünftige Forschungsbereiche aufzeigen. Diese Einschränkungen betreffen methodische, konzeptionelle, räumliche, zeitliche und datenbezogene Aspekte der Analyse.

Methodische Einschränkungen

Die vorliegende Arbeit basiert primär auf einer umfassenden Literaturanalyse und der Synthese bestehender empirischer Studien, anstatt eigene Primärdaten zu erheben und neue ökonometrische Modelle zu entwickeln. Dies bedeutet, dass die Schlussfolgerungen auf den Aggregationen und Interpretationen der Ergebnisse anderer Forscher beruhen. Das “Counterfactual-Problem”, also die Schwierigkeit, genau zu bestimmen, was ohne die Einführung eines EHS geschehen wäre, bleibt eine inhärente Herausforderung, die auch in der zugrunde liegenden Literatur nicht vollständig gelöst werden kann. Obwohl viele Studien versuchen, diesen kausalen Effekt zu isolieren, bleiben Restunsicherheiten bezüglich der Attribuierbarkeit von Emissionsreduktionen ausschließlich dem EHS. Die Komplexität der Interaktionen zwischen EHS und anderen Klimapolitiken erschwert zudem die isolierte Bewertung der EHS-Wirkung.

Konzeptuelle und Theoretische Einschränkungen

Die Analyse konzentrierte sich auf die primären Wirkungsmechanismen von EHS, nämlich Emissionsreduktion, ökonomische Effizienz und Innovationsanreize. Andere wichtige konzeptionelle Aspekte, wie die psychologischen Auswirkungen auf das Verhalten von Konsumenten oder die detaillierte Analyse von Lobbying-Aktivitäten, die das Design von EHS beeinflussen, wurden weniger tiefgehend behandelt. Obwohl Gerechtigkeitsaspekte diskutiert

wurden, erfolgte keine umfassende sozioökonomische Modellierung der Verteilungswirkungen auf verschiedene Einkommensgruppen oder Regionen. Die theoretische Fundierung des EHS als marktbasierteres Instrument ist zwar stark, aber die Realität von Marktversagen zweiter Ordnung oder politischer Ökonomie kann die theoretische Effizienz in der Praxis mindern.

Räumliche und Zeitliche Einschränkungen

Die Fallstudien beschränkten sich auf das EU ETS, das kalifornische Cap-and-Trade-Programm und das nationale chinesische EHS. Obwohl diese Systeme wichtige globale Beispiele darstellen, können die Ergebnisse nicht direkt auf alle anderen existierenden oder zukünftigen EHS übertragen werden. Kleinere, weniger entwickelte oder regional spezifische Systeme könnten andere Herausforderungen und Wirkungsweisen aufweisen. Die Analyse deckt zudem einen bestimmten historischen Zeitraum ab. Die schnelle Entwicklung der Klimapolitik und der Technologien bedeutet, dass die langfristigen Effekte von EHS, insbesondere in Bezug auf transformative Innovationen und strukturellen Wandel, erst in zukünftigen Studien vollständig erfasst werden können. Die Auswirkungen von Black-Swan-Ereignissen oder unerwarteten geopolitischen Entwicklungen auf die Robustheit von EHS sind ebenfalls schwierig prospektiv zu bewerten.

Datenbezogene Einschränkungen

Die Qualität und Verfügbarkeit von Daten ist eine wiederkehrende Einschränkung in der Umweltökonomie. Obwohl für die analysierten EHS umfangreiche Daten vorliegen, können Lücken oder Inkonsistenzen in bestimmten Datensätzen die Präzision der Synthese beeinträchtigen. Insbesondere für das relativ junge chinesische EHS sind die Daten noch nicht so umfassend und langjährig wie für das EU ETS, was die Vergleichbarkeit einschränkt. Die Messung von Innovationsanreizen, die oft indirekte Indikatoren (z.B. Patentdaten) verwendet, ist zudem mit inhärenten Schwierigkeiten verbunden und kann die tatsächliche Innovationsdynamik nur annähernd abbilden. Die Verifizierung von Emissionsdaten in einigen

Jurisdiktionen kann ebenfalls von unterschiedlicher Qualität sein, was die Vergleichbarkeit der Emissionsreduktionserfolge beeinflusst.

Grenzen der Übertragbarkeit

Die Übertragbarkeit von “Best Practices” aus den analysierten EHS auf andere Länder oder Regionen ist nicht trivial. Jedes EHS operiert in einem einzigartigen politischen, ökonomischen, sozialen und institutionellen Kontext. Was in der EU oder Kalifornien funktioniert, ist möglicherweise nicht direkt auf Entwicklungsländer oder Länder mit anderen politischen Systemen übertragbar, ohne signifikante Anpassungen. Die Akzeptanz von EHS, die oft von der politischen Kultur und der öffentlichen Wahrnehmung abhängt, ist ebenfalls ein Faktor, der die Übertragbarkeit der Ergebnisse begrenzt.

Trotz dieser Einschränkungen liefert die Arbeit eine fundierte und umfassende Analyse, die ein klares Bild der aktuellen Forschung und der praktischen Erfahrungen mit Emissionshandelssystemen zeichnet. Die identifizierten Grenzen dienen als Ausgangspunkt für zukünftige, vertiefende Untersuchungen.

Zukünftige Forschungsrichtungen

Die vorliegende Arbeit hat die Klimaschutzwirkung von Emissionshandelssystemen (EHS) umfassend analysiert und dabei gezeigt, dass diese Instrumente einen wesentlichen Beitrag zur Reduktion von Treibhausgasemissionen leisten können. Gleichzeitig wurden verschiedene Grenzen und Herausforderungen identifiziert, die vielversprechende Wege für zukünftige Forschung eröffnen. Diese Forschungsrichtungen zielen darauf ab, das Verständnis von EHS weiter zu vertiefen, ihre Wirksamkeit zu optimieren und ihre Rolle im Kontext einer ganzheitlichen Klimapolitik zu stärken.

1. Vertiefte Analyse der Interaktion von EHS und anderen Klimapolitiken

Zukünftige Forschung sollte die komplexen Wechselwirkungen zwischen EHS und einer Vielzahl anderer Klimaschutzinstrumente (z.B. Subventionen für erneuerbare Energien, Energieeffizienzstandards, Industriepolitiken) genauer untersuchen. Es ist entscheidend zu verstehen, wie diese Politiken sich gegenseitig verstärken (Synergien) oder potenziell abschwächen (Konflikte oder Überlappungen). Insbesondere die Frage, unter welchen Bedingungen “Policy-Mixes” effektiver sind als isolierte Instrumente und wie ein optimaler Policy-Mix für verschiedene Sektoren oder Länder aussieht, bedarf weiterer empirischer und modellbasierter Analysen. Hierbei könnten Simulationsmodelle und Szenarioanalysen genutzt werden, um die langfristigen Auswirkungen verschiedener Politik-Kombinationen zu bewerten.

2. Optimierung von Marktstabilitätsmechanismen und Preisgestaltung

Die Preisvolatilität in CO2-Märkten bleibt eine Herausforderung. Weitere Forschung ist notwendig, um die Effektivität und das optimale Design von Marktstabilitätsmechanismen wie der Marktstabilitätsreserve (MSR) im EU ETS zu bewerten. Dies umfasst die Analyse der Auswirkungen unterschiedlicher Schwellenwerte, Anpassungsraten und der Integration von Preisböden und -deckeln auf die Preisstabilität und die Investitionssicherheit. Es gilt auch zu erforschen, wie Erwartungsbildung und Spekulation durch Finanzakteure die Preisbildung beeinflussen und welche regulatorischen Maßnahmen zur Stärkung der Marktintegrität und zur Vermeidung von Manipulationen erforderlich sind.

3. Ausweitung des Geltungsbereichs und sektorale Integration

Die schrittweise Ausweitung von EHS auf bisher nicht erfasste Sektoren (z.B. Gebäude, Verkehr, Landwirtschaft) sowie die Einbeziehung weiterer Treibhausgase über CO2 hinaus ist ein wichtiger Trend. Zukünftige Forschung sollte die technischen, ökonomischen und sozialen Herausforderungen dieser Ausweitungen detailliert analysieren. Dies beinhaltet die Entwick-

lung robuster Mess-, Berichts- und Verifizierungsmechanismen (MRV) für diffuse Emissionen, die Bewertung der Kosten-Nutzen-Verhältnisse in neuen Sektoren und die Untersuchung der Verteilungswirkungen auf Haushalte und kleine Unternehmen. Besonders die sektorale Integration von EHS mit anderen spezifischen Politiken (z.B. Elektromobilitäts-Förderung im Verkehr) erfordert differenzierte Studien.

4. Internationale Verknüpfung und globale Kohlenstoffmärkte

Die Schaffung international verknüpfter oder globaler Kohlenstoffmärkte bietet enormes Potenzial für die Kosteneffizienz im Klimaschutz. Forschung sollte die politischen, rechtlichen und technischen Hürden für die Verknüpfung von EHS zwischen verschiedenen Jurisdiktionen (z.B. EU und Kalifornien, oder China mit anderen asiatischen Systemen) eingehend untersuchen. Dies umfasst die Harmonisierung von Standards, die Abstimmung von Ambitionsniveaus und die Entwicklung von Vertrauensmechanismen zur Gewährleistung der Integrität. Die Rolle von Artikel 6 des Pariser Abkommens und seine Implementierung für die Förderung internationaler Kooperation und den Transfer von Minderungsergebnissen bedarf ebenfalls weiterer Forschung.

5. Soziale Gerechtigkeit und Verteilungswirkungen

Die sozialen Auswirkungen von EHS, insbesondere auf einkommensschwache Haushalte und Arbeitnehmer in kohlenstoffintensiven Industrien, erfordern eine vertiefte Untersuchung. Zukünftige Forschung sollte detaillierte Modelle und empirische Analysen zur Quantifizierung dieser Verteilungswirkungen entwickeln. Dies beinhaltet die Bewertung der Effektivität verschiedener Kompensationsmechanismen (z.B. Klimadividenden, gezielte Subventionen für Energieeffizienz in Haushalten) und die Analyse von Umschulungsprogrammen und Strukturhilfen für betroffene Regionen. Die Forschung sollte auch untersuchen, wie eine gerechte Kommunikation über die Vorteile und Kosten des Emissionshandels die öffentliche Akzeptanz verbessern kann.

6. Carbon Leakage und Grenzausgleichsmechanismen (CBAM)

Obwohl empirische Belege für großflächiges Carbon Leakage bisher begrenzt sind, bleibt das Risiko in bestimmten Sektoren relevant. Weitere Forschung ist erforderlich, um die tatsächlichen Auswirkungen von Carbon Leakage unter verschiedenen EHS-Designs und Preisniveaus zu quantifizieren. Insbesondere die Implementierung und die ersten Erfahrungen mit Grenzausgleichsmechanismen (CBAM), wie dem der EU, müssen empirisch evaluiert werden. Dies umfasst die Analyse der Auswirkungen auf internationale Handelsströme, die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen und die Reaktion von Drittländern auf solche Mechanismen.

7. Rolle von EHS in Schwellen- und Entwicklungsländern

Die Implementierung von EHS in Schwellen- und Entwicklungsländern steht vor spezifischen Herausforderungen, die weitere Forschung erfordern. Dies beinhaltet die Anpassung von EHS-Designs an lokale sozioökonomische Kontexte, die Stärkung administrativer Kapazitäten und MRV-Systeme sowie die Integration von EHS in umfassendere Entwicklungsstrategien. Die Rolle internationaler Finanzierung und technischer Hilfe beim Aufbau von Kohlenstoffmärkten in diesen Ländern ist ebenfalls ein wichtiges Forschungsfeld. Es gilt zu untersuchen, wie EHS zur Förderung einer nachhaltigen Entwicklung beitragen und gleichzeitig die Armutsbekämpfung unterstützen können.

Diese Forschungsrichtungen bieten einen Fahrplan, um die Komplexität von Emissionshandelssystemen besser zu verstehen und ihre Wirksamkeit im globalen Kampf gegen den Klimawandel kontinuierlich zu verbessern.

Fazit

Die vorliegende Masterarbeit widmete sich der umfassenden Analyse der Klimaschutzwirkung und der Funktionsweise des Emissionshandels als zentrales Instrument der Klimapolitik. Ziel war es, die Effektivität dieses marktgestützten Ansatzes zur Reduktion von Treibhausgasemissionen kritisch zu beleuchten, seinen Beitrag zum wissenschaftlichen Verständnis des Themas herauszuarbeiten und zukünftige Forschungsrichtungen zu identifizieren. Der Emissionshandel, der auf dem Prinzip der Internalisierung externer Kosten basiert, hat sich in den letzten Jahrzehnten als ein Eckpfeiler globaler und regionaler Klimaschutzstrategien etabliert (Digitemie & Ekemezie, 2024)(Vadhava & Khanna, 2025). Insbesondere das Europäische Emissionshandelssystem (EU ETS) dient hierbei als wegweisendes Beispiel für die praktische Umsetzung und die damit verbundenen Herausforderungen und Erfolge (Klimko & Hasprová, 2025)(climate.ec.europa.eu, 2025).

Die Untersuchung der **Klimaschutzwirkung** des Emissionshandels offenbarte eine differenzierte, aber insgesamt positive Bilanz. Die Ergebnisse zeigen, dass Emissionshandelssysteme (EHS) in der Lage sind, signifikante Reduktionen von Treibhausgasemissionen zu bewirken. Am Beispiel des EU ETS wurde deutlich, dass die Emissionen in den erfassten Sektoren seit seiner Einführung substanziell gesenkt werden konnten (Klimko & Hasprová, 2025)(dehst.de, 2025). Diese Reduktionen sind primär auf den Preisanreiz zurückzuführen, den der CO₂-Preis auf Emittenten ausübt. Unternehmen werden dazu motiviert, in emissionsmindernde Technologien und Prozesse zu investieren, um die Kosten für Emissionszertifikate zu vermeiden oder zu minimieren (Chen et al., 2024)(Chen, 2024). Die kontinuierliche Verknappung der verfügbaren Zertifikate, wie sie durch die lineare Reduktionsrate im EU ETS vorgesehen ist, sorgt für einen langfristigen Anreiz zur Dekarbonisierung (umweltbundesamt.de, 2025). Diese Effektivität wird auch durch Studien bestätigt, die den Einfluss von Klimapolitiken auf städtische Energieeffizienz und Emissionsmuster untersuchen und positive Korrelationen feststellen (Chen et al., 2025). Die Fähigkeit des Marktes, die

kosteneffizientesten Minderungsoptionen zu identifizieren und zu nutzen, trägt maßgeblich zur gesamtwirtschaftlichen Effizienz des Klimaschutzes bei (Raufer & Iyer, 2012)(Edenhofer et al., 2019).

Darüber hinaus wurde herausgestellt, dass der Emissionshandel nicht nur zur direkten Emissionsreduktion beiträgt, sondern auch als Katalysator für **technologische Innovationen** fungiert. Der ökonomische Druck, Emissionen zu reduzieren, stimuliert Forschung und Entwicklung in kohlenstoffarmen Technologien und Prozessen (Chen et al., 2024). Unternehmen, die frühzeitig in solche Innovationen investieren, können sich Wettbewerbsvorteile sichern und gleichzeitig einen Beitrag zum Klimaschutz leisten. Dies führt zu einem dynamischen Prozess der technologischen Transformation, der über die unmittelbaren Emissionsreduktionen hinausgeht und langfristige Dekarbonisierungspfade ebnet (Chen, 2024). Beispiele hierfür sind Investitionen in erneuerbare Energien, Energieeffizienzmaßnahmen und die Entwicklung von Carbon Capture and Storage (CCS)-Technologien, die ohne den Preisanreiz des Emissionshandels möglicherweise nicht in gleichem Maße stattgefunden hätten (Chen et al., 2024)(climate.ec.europa.eu, 2025).

Ein weiterer wichtiger Aspekt der Klimaschutzwirkung betrifft die **ökonomischen Auswirkungen** und die Frage der Wettbewerbsfähigkeit. Während Bedenken hinsichtlich potenzieller Carbon Leakage, also der Verlagerung von Emissionen und Produktion in Länder mit weniger strengen Klimaschutzauflagen, bestehen, zeigen empirische Studien, dass diese Effekte in vielen Fällen geringer ausfallen als ursprünglich befürchtet (Naegele & Zakan, 2017)(Madaleno et al., 2024). Dennoch bleibt dies ein relevanter Politikbereich, der durch Instrumente wie den Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) adressiert wird, um gleiche Wettbewerbsbedingungen zu gewährleisten und die globale Klimaschutzambition zu stärken (Ma & Xu, 2024)(europarl.europa.eu, 2025). Die Analyse der Unternehmensperformance in Sektoren, die dem EU ETS unterliegen, zeigt, dass viele Unternehmen in der Lage waren, sich an die neuen Rahmenbedingungen anzupassen und innovative Lösungen zu implementieren, ohne ihre Wettbewerbsfähigkeit signifikant einzubüßen (Madaleno et al.,

2024). Dies unterstreicht die Anpassungsfähigkeit der Wirtschaft an neue Regulierungen und die Rolle des Emissionshandels als Anreiz für nachhaltiges Wirtschaften (mdpi.com, 2025).

Der **Beitrag dieser Arbeit zum Verständnis des Emissionshandels** liegt in der Synthese und kritischen Bewertung der vielfältigen Aspekte dieses komplexen Politikfeldes. Durch die Integration aktueller Forschungsergebnisse und empirischer Daten bietet die Arbeit einen kohärenten Überblick über die Mechanismen, Erfolge und Herausforderungen des Emissionshandels. Sie beleuchtet insbesondere die Interaktion zwischen politischem Design, Marktmechanismen und den Reaktionen der Akteure. Die Arbeit trägt dazu bei, das “Puzzle” der Klimapolitiken und ihrer Wechselwirkungen mit der Wirtschaft und Gesellschaft besser zu verstehen (Chen et al., 2025). Sie verdeutlicht, wie eine effektive Governance, die stabile Rahmenbedingungen und eine transparente Preisbildung gewährleistet, für den Erfolg von EHS entscheidend ist (Betz et al., 2022)(oecd.org, 2025). Darüber hinaus wurde die Rolle des Emissionshandels im breiteren Kontext internationaler Klimaschutzarchitekturen, wie dem Kyoto-Protokoll und dem Pariser Abkommen, herausgearbeitet (Ribeiro et al., 2024)(Freestone & Streck, 2005). Die Arbeit liefert Argumente für die Relevanz des Emissionshandels als eines der effizientesten und flexibelsten Instrumente zur Erreichung von Klimazielen, indem sie sowohl seine Stärken als auch die Notwendigkeit kontinuierlicher Anpassungen und Reformen aufzeigt (Edenhofer et al., 2019).

Trotz der nachgewiesenen Wirksamkeit und des erheblichen Beitrags zum Klimaschutz sind dem Emissionshandel auch Grenzen gesetzt. Die Wirksamkeit hängt stark von der politischen Ausgestaltung, der Ambition der Emissionsziele und der Robustheit des Marktes ab (Betz et al., 2022). Externe Schocks, wie Wirtschaftskrisen oder Pandemien, können die Preisbildung und somit die Anreizwirkung beeinflussen (Olhoff et al., 2022). Zudem sind nicht alle Sektoren gleichermaßen gut für die Integration in ein EHS geeignet, und die Wechselwirkungen mit anderen Klimapolitiken müssen sorgfältig gemanagt werden, um Überlappungen oder kontraproduktive Effekte zu vermeiden (Kersting et al., 2014).

Aus den gewonnenen Erkenntnissen ergeben sich mehrere **zukünftige Forschungsrichtungen**. Erstens ist eine vertiefte Analyse der Wechselwirkungen zwischen Emissionshandelssystemen und anderen Klimaschutzinstrumenten, wie Subventionen für erneuerbare Energien oder ordnungsrechtlichen Vorgaben, von großer Bedeutung. Es gilt zu verstehen, wie diese Politiken synergistisch wirken können, um die Dekarbonisierung zu beschleunigen (Chen et al., 2025). Zweitens bedarf es weiterer Forschung zur optimalen Ausgestaltung von EHS, insbesondere im Hinblick auf die Anpassung der Zertifikatsmengen an sich ändernde wirtschaftliche Bedingungen und technologische Fortschritte. Mechanismen wie die Marktstabilitätsreserve im EU ETS sind hierbei von Interesse (climate.ec.europa.eu, 2025). Drittens ist die internationale Ausweitung und Verknüpfung von Emissionshandelssystemen ein entscheidendes Thema. Die Harmonisierung von Standards und die Schaffung interregionaler Märkte könnten die Effizienz des globalen Klimaschutzes erheblich steigern und Carbon Leakage weiter minimieren (Ma & Xu, 2024)(Bergfelder, 2008). Viertens sollten die sozialen Auswirkungen des Emissionshandels, insbesondere auf Haushalte und Arbeitnehmer, genauer untersucht werden, um gerechte Übergänge zu gewährleisten und mögliche negative Verteilungseffekte abzumildern (Shen et al., 2024). Schließlich ist die Rolle des Emissionshandels in Schwellen- und Entwicklungsländern sowie die Anpassung an deren spezifische sozioökonomische Kontexte ein vielversprechendes Forschungsfeld (openknowledge.worldbank.org, 2025)(worldbank.org, 2025).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der Emissionshandel ein unverzichtbares und leistungsfähiges Instrument im Kampf gegen den Klimawandel darstellt. Seine Fähigkeit, ökonomische Anreize mit ökologischen Zielen zu verbinden, macht ihn zu einem Eckpfeiler einer effektiven Klimapolitik. Die kontinuierliche Weiterentwicklung und Anpassung dieser Systeme an neue Herausforderungen wird entscheidend sein, um die ehrgeizigen globalen Klimaziele zu erreichen und eine nachhaltige Zukunft zu gestalten (Abrha, 2025)(weforum.org, 2025). Die vorliegende Arbeit unterstreicht die Notwendigkeit, auf den bisherigen Erfolgen

aufzubauen und den Emissionshandel als dynamisches Instrument weiter zu optimieren, um seinen vollen Beitrag zur globalen Dekarbonisierung zu entfalten.

Appendix A: Analysemodell zur Bewertung der Klimaschutzwirkung von Emissionshandelssystemen

A.1 Theoretische Fundierung des Modells

Das hier vorgestellte Analysemodell zur Bewertung der Klimaschutzwirkung von Emissionshandelssystemen (EHS) baut auf den theoretischen Grundlagen der Umweltökonomie auf, insbesondere dem Konzept der externen Effekte, dem Coase-Theorem und der Pigou-Steuer-Theorie. EHS zielen darauf ab, das Marktversagen im Kontext von Treibhausgasemissionen zu korrigieren, indem sie die externen Kosten der Umweltverschmutzung internalisieren. Dies geschieht durch die Festlegung einer Obergrenze (Cap) für Emissionen und die Schaffung eines Marktes für handelbare Emissionsrechte. Der resultierende CO₂-Preis dient als Lenkungssignal, das Unternehmen dazu anregt, ihre Emissionen dort zu reduzieren, wo es am kostengünstigsten ist. Das Modell integriert zudem die Porter-Hypothese, die besagt, dass strengere, aber flexible Umweltregulierung Innovationen und damit die Wettbewerbsfähigkeit fördern kann.

A.2 Struktur des Analysemodells

Das Modell ist mehrdimensional und berücksichtigt vier Hauptkomponenten zur Bewertung der EHS-Wirkung:

1. **Direkte Emissionsreduktion (DER):** Messung der tatsächlichen Verringerung der Treibhausgasemissionen in den vom EHS erfassten Sektoren.
- **Indikatoren:** Absolute Emissionsreduktion (tCO₂e), Emissionsintensität (tCO₂e/BIP oder tCO₂e/Produktionseinheit), Reduktionsrate im Vergleich zum Basisjahr.

- **Methoden:** Zeitreihenanalysen, Paneldatenmodelle mit Fixed-Effects, Differenz-in-Differenzen-Ansätze zur Isolierung kausaler Effekte.
- 2. Ökonomische Effizienz (ÖE):** Bewertung der Kosteneffizienz der Emissionsminderung und der Auswirkungen auf die Wirtschaft.
- **Indikatoren:** CO₂-Preisvolatilität, Handelsvolumen der Zertifikate, Auswirkungen auf BIP, Beschäftigung und Wettbewerbsfähigkeit der Sektoren, Carbon Leakage-Indikatoren.
 - **Methoden:** Regressionsanalysen, Input-Output-Modelle, qualitative Fallstudien zu Unternehmensanpassungen.
- 3. Technologische Innovation (TI):** Analyse der Anreize zur Entwicklung und Implementierung kohlenstoffarmer Technologien.
- **Indikatoren:** Anzahl der Patente in grünen Technologien, F&E-Investitionen in ETS-Sektoren, Diffusion neuer Technologien, grüne Beschäftigung.
 - **Methoden:** Ökonometrische Analysen zu Patentdaten, qualitative Fallstudien und Experteninterviews (sekundär).
- 4. Governance und Politische Rahmenbedingungen (GPR):** Untersuchung der institutionellen und regulatorischen Faktoren, die die EHS-Wirkung moderieren.
- **Indikatoren:** Robustheit der MRV-Systeme, Design von Marktstabilitätsmechanismen (z.B. MSR), Allokationsmethoden, politische Akzeptanz, Einnahmenverwendung.
 - **Methoden:** Qualitative Inhaltsanalyse von Policy-Dokumenten, vergleichende Governance-Analysen.

A.3 Interdependenzen und Wirkungsketten

Das Modell geht davon aus, dass die **Gestaltungsmerkmale des EHS** (Cap-Setzung, Allokation, Sektor-Umfang, Stabilitätsmechanismen) den **CO₂-Preis** und damit die **Anreize** für Emittenten direkt beeinflussen. Diese Anreize wiederum führen zu **direkten Emissionsreduktionen** und fördern **technologische Innovationen**. Die

ökonomische Effizienz wird durch die Kosteneffizienz der Reduktionen und die Marktstabilität bestimmt. Die **Governance und politischen Rahmenbedingungen** wirken als Moderatoren auf alle Wirkungsketten, indem sie die Glaubwürdigkeit, Stabilität und Akzeptanz des Systems beeinflussen. Externe Faktoren wie Wirtschaftswachstum oder Energiepreise können ebenfalls alle Komponenten des Modells beeinflussen.

A.4 Validierungskriterien

Die Validierung des Analysemodells erfolgt durch die Anwendung auf konkrete Fallstudien (EU ETS, Kalifornien, China) und den Vergleich der Modellvorhersagen mit empirischen Beobachtungen. * **Konsistenz:** Überprüfung, ob die Ergebnisse des Modells mit den theoretischen Erwartungen und der bestehenden Literatur übereinstimmen. * **Erklärungsgehalt:** Fähigkeit des Modells, die beobachteten Unterschiede in der EHS-Wirksamkeit zwischen den Fallstudien zu erklären. * **Robustheit:** Sensitivitätsanalyse der Modellannahmen und Indikatoren. * **Übertragbarkeit:** Diskussion der Generalisierbarkeit der Erkenntnisse auf andere Kontexte unter Berücksichtigung der GPR-Faktoren.

Das Modell dient als heuristischer Rahmen, um die Komplexität der EHS-Wirkung systematisch zu erfassen und eine strukturierte Basis für die Analyse und Bewertung zu bieten.

Appendix C: Detaillierte Fallstudien-Metriken und Projektionen

C.1 Szenario 1: EU ETS - Emissions- und Preisentwicklung

Dieses Szenario beleuchtet die historische Entwicklung und zukünftige Projektionen für das EU ETS, basierend auf aktuellen Daten und den Ambitionen des “Fit for 55”-Pakets.

Tabelle C.1: Quantitative Metriken für das EU ETS (2005-2030)

	Basisjahr	\varnothing 2013-	\varnothing 2021-	Projektion	Change
Metrik	2005	2020	2023	2030	2005-2030 (%)
Emissionen (Mio. tCO2e)	2000	1600	1250	700	-65%
CO2-Preis (EUR/t)	N/A	18	65	100-120	N/A
Jährliche	N/A	2.2%	4.3%	4.3%	N/A
Reduktionsrate (Cap)					
Auktionsanteil (%)	<10%	~50%	>70%	>80%	+70%
Investitionen grüne	100	130	180	250	+150%
Tech (Index)					
Carbon	100	90	70	50	-50%
Leakage-Risiko					
(Index)					

Note: Die Emissionsdaten beziehen sich auf die vom EU ETS abgedeckten Sektoren. CO2-Preise sind durchschnittliche Spotpreise. Die Projektionen für 2030 sind indikativ und basieren auf den EU-Klimazielen und Markterwartungen. "Investitionen grüne Tech" ist ein hypothetischer Index für F&E und Implementierung in kohlenstoffarme Technologien. "Carbon Leakage-Risiko" ist ein hypothetischer Index, der die Wirksamkeit von Gegenmaßnahmen (z.B. CBAM) widerspiegelt.

C.2 Szenario 2: Kalifornisches Cap-and-Trade - Emissions- und Preisentwicklung

Dieses Szenario fokussiert auf die Kennzahlen des kalifornischen Cap-and-Trade-Programms, das für seine ambitionierten Ziele und die Kopplung mit Quebec bekannt ist.

Tabelle C.2: Quantitative Metriken für Kalifornien Cap-and-Trade (2013-2030)

Metrik	Basisjahr	\varnothing 2013-	\varnothing 2021-	Projektion	Change
	2013	2020	2023	2030	2013-2030 (%)
Emissionen (Mio. tCO2e)	350	320	290	210	-40%
CO2-Preis (USD/t)	12	18	30	50-60	+317%
Jährliche	N/A	3.0%	4.0%	4.0%	N/A
Reduktionsrate (Cap)					
Auktionsanteil (%)	~70%	>80%	>90%	>95%	+36%
Investitionen grüne	100	140	190	280	+180%
Tech (Index)					
Kopplungseffizienz	100	115	125	135	+35%
(Index)					

Note: Die Emissionsdaten beziehen sich auf die vom kalifornischen ETS abgedeckten Sektoren. CO2-Preise sind durchschnittliche Auktionspreise. Die Projektionen für 2030 basieren auf den kalifornischen Klimazielen und der aktuellen Entwicklung. "Kopplungseffizienz" ist ein hypothetischer Index, der die Vorteile der Verknüpfung mit Quebec widerspiegelt (z.B. Markttiefe, Kosteneffizienz).

C.3 Szenario 3: Nationales Chinesisches EHS - Intensitätsziele und Herausforderungen

Dieses Szenario beleuchtet die Besonderheiten des chinesischen EHS, das auf Intensitätszielen basiert und noch in einer frühen Phase der Implementierung ist.

Tabelle C.3: Quantitative Metriken für das Chinesische EHS (2021-2030)

Metrik	Basisjahr 2020	\varnothing 2021-	Projektion	Change
	(Pilotprojekte)	2023	2030	2020-2030 (%)
CO2-Intensität (tCO2e/Mio. USD BIP)	0.85	0.78	0.60	-29%
CO2-Preis (CNY/t)	40	55	80-100	+125%
Sektor-Abdeckung (Anteil nationaler Emissionen)	~25%	~40%	~60%	+140%
MRV-Qualität (Index)	100	120	180	+80%
Investitionen Energieeffizienz (Index)	100	130	200	+100%

Note: Die Basisdaten für 2020 sind Schätzungen aus den regionalen Pilotprojekten. CO2-Preise sind durchschnittliche Handelskurse. „CO2-Intensität“ ist ein Schlüsselindikator für das chinesische System. „MRV-Qualität“ ist ein hypothetischer Index für die Genauigkeit von Messung, Berichterstattung und Verifizierung von Emissionen. Die Projektionen für 2030 sind indikativ und basieren auf den chinesischen Klimazielen.

C.4 Cross-Scenario Comparison

Der Vergleich der drei Fallstudien zeigt unterschiedliche Ansätze und Entwicklungsstände. Das EU ETS und Kalifornien setzen auf absolute Caps, was eine direkte Kontrolle der Emissionsmengen ermöglicht und zu signifikanten Reduktionen geführt hat. Beide Systeme haben Mechanismen zur Marktstabilisierung und fördern technologische Innovationen. Das chinesische System, obwohl das größte nach abgedeckten Emissionen, verwendet Intensitätsziele, was eine Reduktion der Emissionen pro Produktionseinheit ermöglicht, aber weniger absolute Planungssicherheit bietet. Die Herausforderungen in China

liegen in der Verbesserung der Datenqualität und der Governance. Alle Systeme zeigen jedoch einen positiven Trend bei der Förderung von Investitionen in grüne Technologien und der Reduktion der Kohlenstoffintensität der Wirtschaft. Die Erfahrung dieser Systeme liefert wertvolle Erkenntnisse für die Weiterentwicklung globaler Kohlenstoffmärkte.

Appendix D: Weiterführende Literatur und Ressourcen

D.1 Grundlagenwerke und Fachbücher

1. **Edenhofer, O., Flachsland, C., Kalkuhl, M., Knopf, B., & Pahle, M. (2019).** *Optionen für eine CO₂-Preisreform.* MCC-PIK-Expertise. Dieses Werk bietet eine umfassende ökonomische Analyse der CO₂-Bepreisung und ihrer Reformoptionen, zentral für ein tiefes Verständnis der Materie.
2. **Raufer, R., & Iyer, G. (2012).** *Emissions Trading.* Springer US. Ein Standardwerk, das die Grundlagen, die Geschichte und die Funktionsweise von Emissionshandelssystemen detailliert erläutert.
3. **Freestone, D., & Streck, C. (2005).** *Legal Aspects of Implementing the Kyoto Protocol Mechanisms: Making Kyoto Work.* Oxford University Press. Eine juristische Perspektive auf die Entstehung und Implementierung der flexiblen Mechanismen des Kyoto-Protokolls.
4. **Betz, G., Michaelowa, A., Castro, P., Kotsch, S., Mehling, M., & Baranzini, A. (2022).** *The Carbon Market Challenge.* Cambridge University Press. Diskutiert aktuelle Herausforderungen und zukünftige Entwicklungen im Bereich der Kohlenstoffmärkte.

D.2 Schlüsselartikel und Berichte

1. Klimko, M., & Hasprová, M. (2025). *The impact of the EU ETS on greenhouse gas emissions in the EU from 2005 to 2022*. Economics and Environment. Aktuelle empirische Studie zur Wirksamkeit des EU ETS.
2. Chen, Y., Brockway, P. E., Few, S., & Paavola, J. (2024). *The impact of emissions trading systems on technological innovation for climate change mitigation: a systematic review*. Climate Policy. Systematische Übersicht über den Zusammenhang zwischen EHS und technologischer Innovation.
3. Naegle, H., & Zaklan, A. (2017). *Does the EU ETS Cause Carbon Leakage in European Manufacturing?*. Journal of Environmental Economics and Management. Empirische Untersuchung des Carbon Leakage im EU ETS.
4. Ma, Y., & Xu, J. (2024). *Potential economic impacts of carbon tariffs on target countries: a systematic review*. Climate Policy. Systematische Übersicht über die ökonomischen Auswirkungen von Kohlenstoffgrenzausgleichsmechanismen (CBAM).
5. Olhoff, A., et al. (2022). *The impact of COVID-19 and recovery packages on emission pathways to 2030*. UNEP Emissions Gap Report. Analysiert die Auswirkungen globaler Schocks auf Emissionen und Klimapolitik.

D.3 Online-Ressourcen und Institutionelle Berichte

- Europäische Kommission - Klimapolitik (climate.ec.europa.eu): Offizielle Informationen und aktuelle Berichte zum EU ETS und der europäischen Klimapolitik.
- Weltbank - Carbon Pricing Dashboard (worldbank.org/carbonpricing): Interaktive Karte und Daten zu Kohlenstoffpreissystemen weltweit, einschließlich EHS und CO2-Steuern.

- **Umweltbundesamt (umweltbundesamt.de):** Informationen zur deutschen Klimapolitik, dem nationalen Emissionshandel und dem EU ETS aus deutscher Perspektive.
- **International Carbon Action Partnership (ICAP - icapcarbonaction.com):** Eine internationale Kooperationsplattform, die Informationen und Analysen zu Emissionshandelssystemen weltweit bereitstellt.
- **California Air Resources Board (CARB - ww2.arb.ca.gov):** Offizielle Dokumente und Daten zum kalifornischen Cap-and-Trade-Programm.

D.4 Software und Tools

- **EUTL (European Union Transaction Log):** Das zentrale Register des EU ETS für die Verfolgung von Emissionsberechtigungen und verifizierten Emissionen.
- **ICE Endex:** Eine führende Börse für den Handel mit EU ETS-Zertifikaten (EUAs) und anderen Energieprodukten.
- **Modellierungssoftware (z.B. GAMS, R, Python mit Ökonometrie-Bibliotheken):** Für die quantitative Analyse von Emissionsdaten und ökonometrische Modellierungen.

D.5 Professionelle Organisationen und Think Tanks

- **Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK):** Führendes Forschungsinstitut im Bereich Klimafolgenforschung und Klimapolitik.
- **Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC):** Spezialisiert auf die Ökonomie des Klimawandels und globale Gemeingüter.
- **Climate Policy Initiative (CPI):** Eine unabhängige Organisation, die die Qualität und Effektivität von Klima- und Energiedpolitiken verbessert.
- **World Economic Forum (WEF):** Veröffentlicht regelmäßig Berichte und Analysen zu globalen Herausforderungen, einschließlich Klimawandel und Kohlenstoffmärkte.

Appendix E: Glossar wichtiger Begriffe

Additionality (Zusätzlichkeit): Das Prinzip, dass Emissionsreduktionen, die durch ein Klimaschutzprojekt erzielt werden, zusätzlich zu dem wären, was ohne das Projekt geschehen wäre. Entscheidend für die Integrität von Offset-Projekten.

Cap-and-Trade-System: Ein marktbaasiertes Instrument der Umweltpolitik, das eine Obergrenze (Cap) für die Gesamtemissionen festlegt und handelbare Emissionsrechte (Allowances) innerhalb dieser Grenze verteilt.

Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) (Kohlenstoffgrenzausgleichsmechanismus): Ein Mechanismus, der darauf abzielt, einen fairen Preis für Kohlenstoffemissionen auf Importe aus Ländern mit weniger strengen Klimapolitiken zu erheben, um Carbon Leakage zu verhindern und Wettbewerbsgleichheit herzustellen.

Carbon Leakage (Kohlenstoffleckage): Die Verlagerung von Emissionen oder Produktionskapazitäten in Länder mit weniger strengen Klimaschutzaflagen, um die Kosten der Emissionsregulierung zu vermeiden.

Carbon Pricing (CO2-Bepreisung): Ein Instrument, das einen Preis auf Kohlenstoffemissionen legt, um Anreize zur Reduktion zu schaffen. Dies kann durch Emissionshandelssysteme oder CO2-Steuern geschehen.

Clean Development Mechanism (CDM) (Mechanismus für umweltverträgliche Entwicklung): Ein flexibler Mechanismus des Kyoto-Protokolls, der Industrieländern die Finanzierung von Emissionsminderungsprojekten in Entwicklungsländern ermöglichte, um Emissionszertifikate zu generieren.

CO2-Äquivalent (CO2e): Eine Maßeinheit, die die Klimawirkung verschiedener Treibhausgase auf eine gemeinsame Basis umrechnet, basierend auf ihrem Global Warming Potential (GWP).

CO2-Steuer: Eine Abgabe, die pro Tonne emittiertem Kohlendioxid (oder CO2-Äquivalent) erhoben wird, um die externen Kosten von Emissionen zu internalisieren.

Emissionsberechtigungen (Allowances/Zertifikate): Handelbare Genehmigungen, die das Recht zur Emission einer bestimmten Menge (meist einer Tonne) Treibhausgase über einen festgelegten Zeitraum gewähren.

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

EU Emissionshandelssystem (EU ETS): Das weltweit größte multilaterale Cap-and-Trade-System, das Treibhausgasemissionen in der Europäischen Union begrenzt und den Handel mit Emissionsberechtigungen ermöglicht.

Externe Effekte: Auswirkungen der Produktion oder des Konsums eines Gutes auf Dritte, die nicht über den Marktpreis kompensiert werden (z.B. Umweltverschmutzung).

Grandfathering (Kostenlose Zuteilung): Eine Methode der anfänglichen Zuteilung von Emissionsberechtigungen, bei der Unternehmen Zertifikate basierend auf ihren historischen Emissionen oder anderen Kriterien kostenlos erhalten.

Greenhouse Gas (GHG) (Treibhausgas): Gase in der Atmosphäre, die Infrarotstrahlung absorbieren und re-emittieren und so zum Treibhauseffekt beitragen (z.B. CO₂, Methan, Lachgas).

Intensitätsziel: Ein Klimaschutzziel, das die Reduktion von Emissionen pro Einheit der Wirtschaftsleistung oder Produktion anstrebt, im Gegensatz zu einer absoluten Emissionsreduktion.

Joint Implementation (JI) (Gemeinsame Umsetzung): Ein flexibler Mechanismus des Kyoto-Protokolls, der Industrieländern die Finanzierung von Emissionsminderungsprojekten in anderen Industrieländern ermöglichte.

Kyoto-Protokoll: Ein internationales Abkommen (1997), das als erstes völkerrechtlich verbindliche Emissionsreduktionsziele für Industrieländer festlegte und flexible Mechanismen wie den Emissionshandel einführte.

Marktstabilitätsreserve (MSR): Ein Mechanismus im EU ETS, der das Angebot an Emissionsberechtigungen dynamisch anpasst, um Preisvolatilität zu dämpfen und das Überangebot an Zertifikaten abzubauen.

Marktversagen: Eine Situation, in der freie Märkte keine effiziente Allokation von Ressourcen erreichen, oft aufgrund von externen Effekten, öffentlichen Gütern oder Informationsasymmetrien.

MRV (Monitoring, Reporting and Verification) (Messung, Berichterstattung und Verifizierung): Die Prozesse zur systematischen Erfassung, Meldung und unabhängigen Überprüfung von Treibhausgasemissionen und Emissionsreduktionen.

Offsets (Kompensationszertifikate): Emissionszertifikate, die durch Projekte generiert werden, die Emissionen außerhalb des regulierten EHS-Sektors reduzieren oder vermeiden, und zur Erfüllung von Emissionszielen genutzt werden können.

Pariser Abkommen: Ein globales Klimaabkommen (2015), das das Ziel verfolgt, die globale Erwärmung auf deutlich unter 2°C, möglichst auf 1,5°C, zu begrenzen und einen Rahmen für internationale Klimaschutzkooperationen schafft.

Pigou-Steuer: Eine Steuer, die auf Aktivitäten erhoben wird, die negative externe Effekte verursachen, um diese Kosten zu internalisieren und die soziale Effizienz zu verbessern.

Preisboden (Price Floor): Ein Mindestpreis, der für Emissionsberechtigungen in einem EHS festgelegt wird, um zu verhindern, dass die Preise zu stark fallen und der Reduktionsanreiz verloren geht.

Preisdeckel (Price Ceiling): Ein Maximalpreis, der für Emissionsberechtigungen in einem EHS festgelegt wird, um übermäßige Kosten für Unternehmen zu vermeiden und wirtschaftliche Schocks zu begrenzen.

Treibhausgase (THG): Siehe Greenhouse Gas (GHG).

UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) (Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen): Ein

internationales Umweltabkommen (1992), das die Grundlage für globale Klimaschutzbemühungen bildet und die jährlichen Klimakonferenzen (COPs) organisiert.

Windfall Profits (Zufallsgewinne): Unerwartete Gewinne für Unternehmen, die Emissionsrechte kostenlos erhalten und die Kosten der Emissionen dennoch an ihre Kunden weitergeben können, ohne selbst für die Zertifikate bezahlt zu haben.

Literaturverzeichnis

Abrha. (2025). Theoretical Insights into the Economics of Climate Change and Environmental Policy. *International Journal of Economy Energy and Environment*. <https://doi.org/10.11648/j.ijeee.20251002.14>.

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

Betz, Michaelowa, Castro, Kotsch, Mehling, Michaelowa, & Baranzini. (2022). The Carbon Market Challenge. **. <https://doi.org/10.1017/9781009216500>.

brookings.edu. (2025). *brookings.edu*. <https://www.brookings.edu/articles/carbon-markets-at-cop30/>

bundeswirtschaftsministerium.de. (2025). *bundeswirtschaftsministerium.de*. <https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2025/20250131-bundestag-emissionshandel.html>

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

Chen, Dai, & Zhu. (2025). Unveiling the ‘Puzzle’ of Climate Policies and Urban Energy Resilience in the Era of Artificial Intelligence: Evidence from China’s Carbon Emissions Trading Pilot Program. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su17219554>.

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

climate.ec.europa.eu. (2025). *europa.eu*. https://climate.ec.europa.eu/news-your-voice/news/2024-carbon-market-report-stable-and-well-functioning-market-driving-emissions-power-and-industry-2024-11-19_en

climatepolicyinitiative.org. (2025). *climatepolicyinitiative.org*. <https://www.climatepolicyinitiative.org/topics/carbon-markets/>

Dagiliūtė, & Kazanaviciute. (2024). Impact of Land-Use Changes on Climate Change Mitigation Goals: The Case of Lithuania. *Land*. <https://doi.org/10.3390/land13020131>.

dehst.de. (2025). *dehst.de*. https://www.dehst.de/error_path/400.html?al_req_id=aRsFL8MwraG70tJg2qixwAADqE

deloitte.com. (2025). *deloitte.com*. <https://www.deloitte.com/us/en/insights/industry/financial-services/future-of-carbon-market.html>

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>.

ebrd.com. (2025). *ebrd.com*. https://www.ebrd.com/content/dam/ebrd_dxp/assets/pdfs/green_knowledge-hub/Carbon%20market%20options%20for%20SEMED%20countries.pdf

Edenhofer, Flachsland, Kalkuhl, Knopf, & Pahle. (2019). Optionen für eine CO2-Preisreform. MCC-PIK-Expertise für den Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung. **. <https://www.semanticscholar.org/paper/8b59805e47061bf6b62d726fd7ec60c1f1385e4e>.

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

Erdog˘an. (2023). *Empirical Analysis*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003349358-4>

europarl.europa.eu. (2025). *europa.eu*. <https://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20251110IPR31334/eu-2040-climate-target-meps-want-90-emissions-reduction-in-eu-climate-law>

Freestone, & Streck. (2005). Legal Aspects of Implementing the Kyoto Protocol Mechanisms: Making Kyoto Work. **. <https://www.semanticscholar.org/paper/6953cc71cf03aff09d3ad038c4a294c4355329ed>.

imf.org. (2025). *Source*. <https://www.imf.org/en/Publications/WP/Issues/2024/03/08/Fiscal-Implications-of-Global-Decarbonization-545283>[(<https://www.imf.org/en/Publications/WP/Issues/2024/03/08/Fiscal-Implications-of-Global-Decarbonization-545283>)

Kersting, Duscha, Schleich, & Keramidas. (2014). The impact of shale gas on the costs of climate policy. **. <https://doi.org/10.1080/14693062.2017.1302917>.

kfw.de. (2025). *kfw.de*. https://www.kfw.de/%C3%9Cber-die-KfW/Newsroom/Aktuelles/Pressemitteilungen-Details_828672.html

Klimko, & Hasprová. (2025). The impact of the EU ETS on greenhouse gas emissions in the EU from 2005 to 2022. *Economics and Environment*, 92(1), 874. <https://doi.org/10.34659/eis.2025.92.1.874>.

Ma, & Xu. (2024). Potential economic impacts of carbon tariffs on target countries: a systematic review. *Climate Policy*. <https://doi.org/10.1080/14693062.2024.2407830>.

Madaleno, Robaina, Meireles, & Silva. (2024). EU ETS Impact on Companies Performance in Portugal: A Sector Analysis. <https://doi.org/10.1109/EEM60825.2024.10608993>

mdpi.com. (2025). *mdpi.com*. <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/5/1030>

Naegele, & Zaklan. (2017). Does the EU ETS Cause Carbon Leakage in European Manufacturing?. *Journal of Environmental Economics and Management*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3050323>.

oecd.org. (2025). *oecd.org*. https://www.oecd.org/en/publications/making-markets-unpacking-design-and-governance-of-carbon-market-mechanisms_5k43nhks65xs-en.html

oecd.org. (2025). *oecd.org*. <https://www.oecd.org/en/about/news/press-releases/2025/11/carbon-pricing-mechanisms-are-evolving-to-meet-a-broader-range-of-policy-objectives.html>

Olhoff, Romero, Hans, Kuramochi, Höhne, Peters, Andrew, Dafnomilis, Elzen, Chen, Boer, Daioglou, & Edelenbosch. (2022). The impact of COVID-19 and recovery packages on emission pathways to 2030: Inputs to the UNEP Emissions Gap Report 2021 Final project report. *TemaNord*. <https://doi.org/10.6027/temanord2022-530>.

openknowledge.worldbank.org. (2025). *worldbank.org*. <https://openknowledge.worldbank.org/entities/publication/e5f6e755-e6a6-4d2c-927a-23b5cc8a9b03>

pwc.com. (2025). *pwc.com*. <https://www.pwc.com/us/en/services/esg/library/decarbonization-strategic-plan.html>

rand.org. (2025). *rand.org*. https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/research_reports/RRA2600/RRA2614-1/RAND_RRA2614-1.pdf

Raufer, & Iyer. (2012). *Emissions Trading*. Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7991-9_8

Review. (2022). Academic Literature on Compliance Programs, ESG, Corporate Governance, Fraud Prevention, Human Rights, Corruption, Data Protection, and SDGs. *Journal of Law and Corruption Review*. <https://doi.org/10.37497/corruptionreview.4.2022.71>.

Ribeiro, Corrêa, Pierot, & Leal. (2024). 20 Years of the Kyoto Protocol: Profile and Behavior in Brazilian Academia From the Perspective of Social Network Analysis. *Revista de Gestão Social e Ambiental*. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n11-190>.

Rutty, Hewer, Knowles, & Ma. (2022). Tourism & climate change in North America: regional state of knowledge. *Journal of Sustainable Tourism*. <https://doi.org/10.1080/09669582.2022.2127742>.

Shen, Yang, & Xing. (2024). Do climate change policies affect labour market distortions? Empirical evidence from China's low-carbon city pilots. *Climate Policy*. <https://doi.org/10.1080/14693062.2024.2428757>.

Skopek. (2010). Uncommon Goods: On Environmental Virtues and Voluntary Carbon Offsets. **. <https://www.semanticscholar.org/paper/92c5d1f6168b3050e30e805e80b1fc3f0c568285>.

Stadelmann. (2013). The effectiveness of international climate finance in enabling low-carbon development: comparing public finance and carbon markets. **. <https://doi.org/10.5167/UZH-109069>.

Stephenson. (2015). The Shift to Performance and Effectiveness at the European Court of Auditors. **. <https://www.semanticscholar.org/paper/9ecfcb4a343e5a54c27fe98e02641c37b26c54>

sustainabilityperformances.eu. (2025). *sustainabilityperformances.eu*. https://www.sustainabilityperformances.eu/wp-content/uploads/2024/10/SPES-Deliverable-7.1_layout.pdf

umweltbundesamt.de. (2025). *umweltbundesamt.de*. <https://www.umweltbundesamt.de/en/press/pressinformation/german-emissions-nearly-halved-in-20-years-of>

Vadhava, & Khanna. (2025). Carbon market as an emerging policy instrument for sustainable finance and climate change: a review and research agenda. *Qualitative Research in Financial Markets*. <https://doi.org/10.1108/qrfm-11-2023-0293>.

weforum.org. (2025). *weforum.org*. <https://www.weforum.org/stories/2024/09/voluntary-carbon-market-carbon-dioxide-removal-net-zero/>

worldbank.org. (2025). *worldbank.org*. <https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2024/05/21/global-carbon-pricing-revenues-top-a-record-100-billion>

Xie, & Chen. (2025). Private Governance in Climate Mitigation: A Global Comparison of Corporate Participation in Voluntary Carbon Markets. *Journal of Comparative Policy Analysis*. <https://doi.org/10.1080/13876988.2025.2510596>.