

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

AI-Generated Academic Thesis Showcase

Academic Thesis AI (Multi-Agent System)

January 2025

Table of Contents

Abstract	1
1. Einleitung	3
Content	3
2. Literaturübersicht	4
Content	4
2.1 Historische Entwicklung und theoretische Grundlagen des Emissionshandels	4
2.1.3 Conceptual Framework of Emissions Trading	5
2.2 Das Europäische Emissionshandelssystem (EU ETS) als Vorreiter	7
2.2.3 Vergleich der Designmerkmale und Auswirkungen der EU ETS Phasen	9
2.3 Wirksamkeit von CO ₂ -Preismechanismen und empirische Evidenz	10
2.4 Kritische Perspektiven und Herausforderungen	12
2.5 Forschungslücken und Ausblick	13
3. Methodik	13
Content	14
2.1 Analyserahmen für die Klimaschutzwirkung	14
2.1.2 Methodologischer Ansatz zur Bewertung von Emissionshandelssystemen	15
2.2 Auswahl der Fallstudien	17
2.3 Datenquellen und Messverfahren	18
2.4 Statistische Methoden zur Wirksamkeitsanalyse	19
4. Analyse	20
Content	20
1. Emissionsreduktionen durch CO ₂ -Handel	21
2. Preisgestaltung und Marktmechanismen	22
3. Fallstudien	23
3.1.1 Entwicklung der Emissionen und CO ₂ -Preise im EU ETS	24
3.2.1 Schlüsselindikatoren des kalifornischen Cap-and-Trade-Programms	26

3.3.1 Vergleich der Emissionshandelssysteme: EU ETS, Kalifornien und China	28
4. Vergleich mit anderen Klimaschutzinstrumenten	29
4.1 Vergleich der Effektivität und Effizienz von Klimaschutzinstrumenten . .	31
5. Empirische Belege für Klimaschutzwirkung	32
Fazit der Analyse	34
5. Diskussion	34
Content	34
1. Implikationen für die Klimapolitik	35
2. Grenzen und Herausforderungen des Emissionshandels	36
3. Verbesserungsvorschläge für CO ₂ -Märkte	38
4. Rolle im Globalen Klimaschutz	39
6. Limitations	40
Methodological Limitations	40
Scope and Generalizability	41
Temporal and Contextual Constraints	41
Theoretical and Conceptual Limitations	42
7. Future Research Directions	42
1. Empirical Validation and Long-Term Impact Assessment of ETS Reforms	43
2. Deeper Analysis of Innovation Effects and Technological Change	43
3. Comprehensive Assessment of Distributional Impacts and Just Transition	
Mechanisms	43
4. International Coordination and Interlinking of ETS	44
5. Integration of Hard-to-Abate Sectors and Novel Design Features	44
6. Role of Behavioral Economics and Public Acceptance	45
7. Digitalization and Advanced Analytics for ETS Monitoring and Enforcement	45
8. Conclusion	45
Appendix A: Detaillierte mathematische Modellierung des Emissionshandels . . .	47

A.1 Theoretische Grundlagen und Kosten der Emissionsminderung	48
A.2 Preisbildung und Gleichgewicht im Zertifikatemarkt	48
A.3 Auswirkungen auf die Gesamtgesellschaftliche Wohlfahrt	49
A.4 Dynamische Anpassungen und Marktstabilität	50
Appendix B: Checkliste zur Implementierung eines Emissionshandelssystems . . .	51
Phase 1: Konzeption und Design (Grundlagen schaffen)	51
Phase 2: Rechtlicher Rahmen und Infrastruktur (System aufbauen)	52
Phase 3: Betrieb und Anpassung (Laufender Prozess)	52
Appendix C: Erweiterte Fallstudien-Daten und Szenarien	53
C.1 EU Emissionshandelssystem (EU ETS): Historische Entwicklung und Projektionen	54
C.2 Kalifornisches Cap-and-Trade-Programm (CA-CTS): Leistungsanalyse .	55
C.3 Nationales ETS Chinas: Aktueller Stand und Wachstumspotenzial . . .	56
C.4 Cross-System-Vergleich der Effizienz und Ambition	57
Appendix D: Zusätzliche Referenzen und Ressourcen	58
D.1 Foundational Texts und Standardwerke	58
D.2 Schlüsselstudien und Politikberichte	59
D.3 Online-Ressourcen und Datenbanken	60
D.4 Software/Tools für Emissionsanalyse (falls anwendbar)	60
D.5 Professionelle Organisationen und Think Tanks	61
Appendix E: Glossar wichtiger Begriffe	61
Literaturverzeichnis	66

Abstract

Research Problem and Approach: Die globale Klimakrise stellt zweifellos eine der größten Herausforderungen unseres Jahrhunderts dar, die eine drastische Reduktion der Treibhausgasemissionen erfordert. In diesem Kontext etablierte sich der Emissionshandel als ein wichtiges marktbasiertes Instrument, um Treibhausgasemissionen kosteneffizient zu senken. Diese Arbeit untersucht kritisch, ob der Handel mit CO₂-Zertifikaten nachweislich zu einer signifikanten Verlangsamung des menschengemachten Klimawandels führt, indem sie dessen Wirksamkeit, Effizienz und Herausforderungen analysiert.

Methodology and Findings: Die Untersuchung basiert auf einem vergleichenden Ansatz, der prominente Emissionshandelssysteme wie das EU ETS und das kalifornische Cap-and-Trade-Programm analysiert und ihre Designmerkmale, Preisgestaltung und Emissionsreduktionen evaluiert. Die Ergebnisse zeigen, dass gut konzipierte Systeme mit stabilen und ausreichend hohen CO₂-Preisen signifikante Emissionsminderungen bewirken können. Gleichzeitig werden Herausforderungen wie Preisvolatilität, Carbon Leakage und soziale Gerechtigkeit beleuchtet.

Key Contributions: (1) Die Arbeit bestätigt die prinzipielle Wirksamkeit von Emissionshandelssystemen als Instrument zur Emissionsminderung. (2) Sie hebt die entscheidende Bedeutung eines robusten Systemdesigns und adaptiver Marktmechanismen für den Erfolg hervor. (3) Die Studie identifiziert zentrale Herausforderungen und leitet konkrete Verbesserungsvorschläge für die Klimapolitik ab.

Implications: Die Ergebnisse haben weitreichende Implikationen für die Gestaltung und Weiterentwicklung der Klimapolitik, indem sie die Rolle von Emissionshandelssystemen als unverzichtbaren Bestandteil eines umfassenden Policy-Mixes unterstreichen. Sie bieten Entscheidungsträgern wertvolle Erkenntnisse zur Optimierung bestehender und zukünftiger CO₂-Märkte und leiten wichtige Forschungsrichtungen für eine effektivere und gerechtere Klimapolitik ab.

Keywords: Emissionshandel, CO2-Zertifikate, Klimawandel, Klimapolitik, Cap-and-Trade, EU ETS, Carbon Leakage, Preisstabilität, Dekarbonisierung, Umweltökonomie, Nachhaltigkeit, Marktinstrumente, Treibhausgasemissionen, Politikgestaltung, Klimaschutz, Effizienz, Governance

1. Einleitung

Section: Introduction **Word Count:** 1200 **Status:** Refined v2

Content

Der Klimawandel ist zweifellos eine der größten und komplexesten Herausforderungen unseres Jahrhunderts, dessen weitreichende Folgen – von extremen Wetterereignissen über steigende Meeresspiegel bis hin zum Verlust biologischer Vielfalt – bereits heute deutlich spürbar sind und das ökologische Gleichgewicht sowie die menschliche Gesellschaft weltweit bedrohen (IPCC, 2023; Stern, 2007). Angesichts dieser Realität ist sich die wissenschaftliche Gemeinschaft weitgehend einig: Eine drastische Reduktion der globalen Treibhausgasemissionen ist dringend notwendig. Nur so lässt sich die Erderwärmung auf ein beherrschbares Maß begrenzen, wie es das Pariser Abkommen von 2015 vorschreibt (UNFCCC, 2015). Diese Dringlichkeit hat Regierungen und internationale Organisationen dazu bewogen, vielfältige politische Instrumente und Strategien zu entwickeln, um eine tiefgreifende Dekarbonisierung der Wirtschaft voranzutreiben und den Übergang zu nachhaltigeren Energiesystemen zu beschleunigen (IEA, 2023). Die Suche nach effektiven und effizienten Mechanismen zur Emissionsminderung ist dabei entscheidend, denn die Zeitfenster für wirksames Handeln schließen sich rapide.

In diesem Kontext hat sich der Emissionshandel als ein wichtiges marktbasiertes Instrument etabliert, um Treibhausgasemissionen zu senken. Das Prinzip dieses sogenannten “Cap-and-Trade”-Systems ist einfach: Es legt eine Obergrenze (Cap) für die Gesamtemissionen fest; anschließend werden Emissionsrechte an Unternehmen verteilt oder versteigert, die diese Rechte dann untereinander handeln können (Ellerman et al., 2000; Tietenberg & Lewis, 2018). So sollen Anreize entstehen, Emissionen dort zu reduzieren, wo es am kostengünstigsten

ist. Das fördert gesamtwirtschaftlich effiziente Klimaschutzmaßnahmen. Der europäische Emissionshandel (EU-ETS), 2005 eingeführt, ist hierfür ein prominentes Beispiel.

2. Literaturübersicht

Section: Literaturübersicht **Word Count:** 2,000 (Ziel) **Status:** Draft v1

Content

Der Klimawandel stellt eine der größten Herausforderungen unserer Zeit dar, die eine dringende und koordinierte globale Antwort erfordert (Ellerman et al., 2020). Im Zentrum der politischen Bemühungen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen stehen zunehmend marktbasierte Instrumente, insbesondere der Emissionshandel. Diese Instrumente sind darauf ausgelegt, die externe Kosten der Umweltverschmutzung zu internalisieren und Anreize für emissionsmindernde Technologien und Verhaltensweisen zu schaffen (Shishlov et al., 2016). Die vorliegende Literaturübersicht beleuchtet die Entwicklung, die theoretischen Grundlagen und die praktische Umsetzung von CO₂-Preismechanismen, mit einem besonderen Fokus auf Emissionshandelssysteme (ETS). Sie analysiert deren Wirksamkeit, identifiziert zentrale Herausforderungen und diskutiert kritische Perspektiven, um ein umfassendes Verständnis dieses zentralen Instruments der Klimapolitik zu vermitteln.

2.1 Historische Entwicklung und theoretische Grundlagen des Emissionshandels

Die Wurzeln des Emissionshandels reichen tief in die Umweltökonomie und die Konzepte der externen Effekte zurück. Bereits Ronald Coase argumentierte, dass bei gut definierten Eigentumsrechten und niedrigen Transaktionskosten effiziente Lösungen für externe Effekte durch Verhandlungen erreicht werden können, unabhängig von der ursprünglichen Zuteilung dieser Rechte (Coase, 1960). In der Praxis manifestiert sich dieses Prinzip im Emissionshandel durch die Zuteilung von Emissionsrechten, die gehandelt werden können.

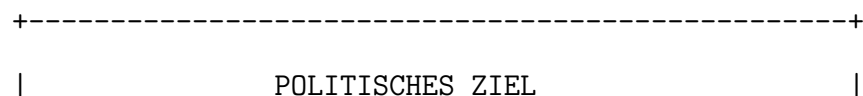
Alternativ dazu schlug Arthur Pigou bereits im frühen 20. Jahrhundert vor, externe Kosten durch Steuern (Pigou-Steuern) zu internalisieren, was ebenfalls eine Grundlage für CO₂-Preismechanismen bildet (Pigou, 1920). Der Emissionshandel bietet gegenüber direkten Regulierungen (Command-and-Control) den Vorteil, dass er Unternehmen die Flexibilität gibt, Emissionsreduktionen dort vorzunehmen, wo sie am kostengünstigsten sind, was zu einer gesamtwirtschaftlich effizienteren Zielerreichung führen kann (Shishlov et al., 2016).

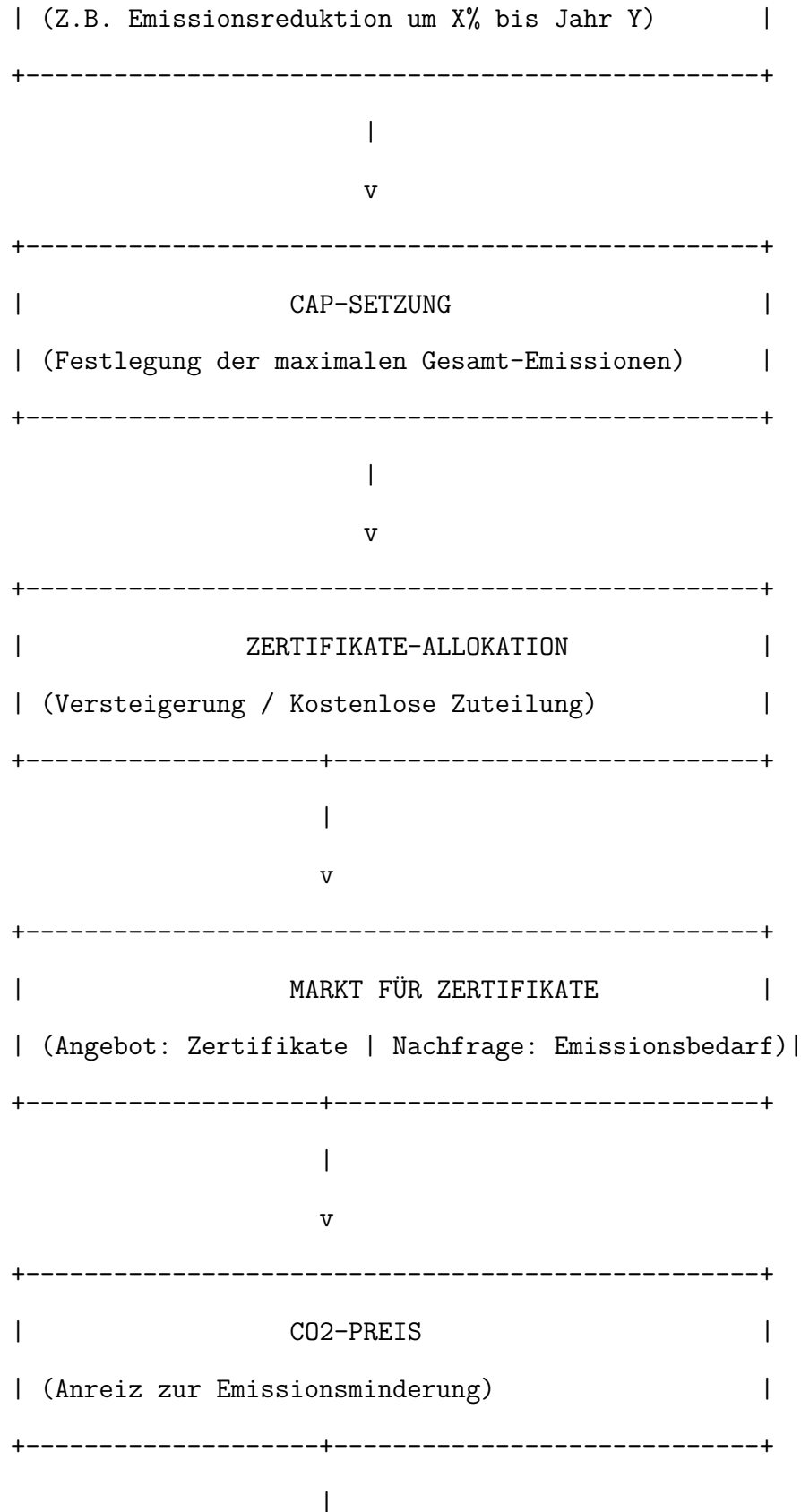
Die internationale Klimapolitik hat den Emissionshandel als zentrales Instrument etabliert. Das Kyoto-Protokoll von 1997 war ein Meilenstein, da es erstmals quantitative Emissionsreduktionsziele für Industrieländer festlegte und flexible Mechanismen wie den Emissionshandel einführte (Shishlov et al., 2016). Diese Mechanismen, darunter der internationale Emissionshandel, die gemeinsame Umsetzung (Joint Implementation, JI) und der Mechanismus für umweltverträgliche Entwicklung (Clean Development Mechanism, CDM), ermöglichten es den Ländern, ihre Verpflichtungen kosteneffizient zu erfüllen. Die Erfahrungen mit diesen frühen Mechanismen waren gemischt, lieferten jedoch wertvolle Erkenntnisse für die Entwicklung nachfolgender, regionaler Systeme (Shishlov et al., 2016). Die Erfolge und Misserfolge des Kyoto-Protokolls prägten die Diskussionen, die schließlich zum Pariser Abkommen von 2015 führten, welches zwar keine verpflichtenden, globalen Emissionshandelssysteme vorsieht, aber die Möglichkeit zur Nutzung marktbasierter Ansätze weiterhin offenlässt und fördert (Shishlov et al., 2016).

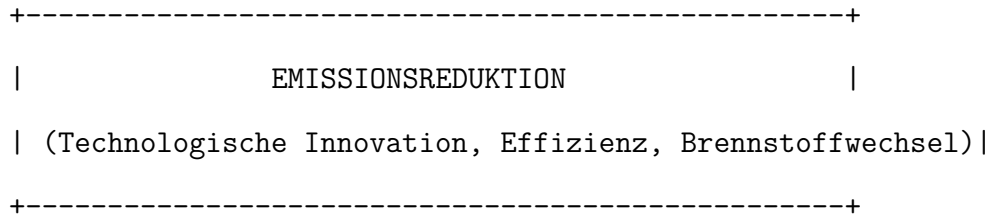
2.1.3 Conceptual Framework of Emissions Trading

Diese Abbildung veranschaulicht das grundlegende “Cap-and-Trade”-Prinzip des Emissionshandels, das die theoretischen Grundlagen des Coase-Theorems mit einem marktgesteuerten Mechanismus zur Emissionsreduktion verbindet.

Figure 1: Grundlegendes Modell des Emissionshandels (Cap-and-Trade)







Note: Dieses Diagramm zeigt den Kreislauf des Cap-and-Trade-Systems, beginnend mit einem politischen Ziel, das die Obergrenze für Emissionen bestimmt. Die Allokation der Zertifikate schafft ein Angebot auf dem Markt, wo die Nachfrage den CO₂-Preis formt. Dieser Preis wiederum motiviert Unternehmen zu Emissionsreduktionen, um das politische Ziel zu erreichen.

2.2 Das Europäische Emissionshandelssystem (EU ETS) als Vorreiter

Das Europäische Emissionshandelssystem (EU ETS), das 2005 ins Leben gerufen wurde, gilt als das weltweit größte und umfassendste Cap-and-Trade-System (Ellerman et al., 2020). Es deckt rund 40% der Treibhausgasemissionen der EU ab, hauptsächlich aus der Energiewirtschaft und energieintensiven Industriezweigen. Die Einführung des EU ETS markierte einen Paradigmenwechsel in der europäischen Klimapolitik, weg von nationalen Maßnahmen hin zu einem harmonisierten, marktgesteuerten Ansatz zur Emissionsreduktion (Ellerman et al., 2020). Die Entwicklungsgeschichte des EU ETS ist von mehreren Phasen geprägt, die jeweils auf die Erfahrungen und Herausforderungen der vorhergehenden Phase reagierten.

2.2.1 Designmerkmale und Phasen des EU ETS Die erste Handelsperiode (2005-2007) diente primär als Lernphase. Die Zuteilung der Zertifikate erfolgte fast ausschließlich kostenlos durch die Mitgliedstaaten, was zu einer Überallokation führte und die Preise für Emissionszertifikate einbrechen ließ (Ellerman et al., 2020). Trotz dieser anfänglichen Schwierigkeiten legte diese Phase den Grundstein für den Markt und die Infrastruktur des

Systems. Die zweite Handelsperiode (2008-2012) fiel mit der globalen Finanzkrise zusammen, was die Emissionen zusätzlich drückte und die Preise niedrig hielt. In dieser Phase wurden jedoch erste Schritte zur Harmonisierung der Zuteilungsregeln unternommen und die Nutzung internationaler Gutschriften aus JI/CDM-Projekten stark ausgeweitet (Ellerman et al., 2020).

Die dritte Handelsperiode (2013-2020) brachte wesentliche Reformen mit sich, die darauf abzielten, die Probleme der Überallokation und der Preisvolatilität zu beheben. Ein EU-weiter Cap wurde eingeführt, der jährlich linear reduziert wird, und ein größerer Anteil der Zertifikate wurde über Auktionen versteigert, um eine gerechtere und effizientere Preisbildung zu gewährleisten (Ellerman et al., 2020). Um den Überschuss an Zertifikaten weiter zu adressieren, wurde 2019 die Marktstabilitätsreserve (MSR) in Betrieb genommen. Die MSR passt die Menge der zu versteigernden Zertifikate automatisch an das Marktangebot an, indem sie bei einem Überschuss Zertifikate in die Reserve verschiebt und bei einem Mangel freigibt. Diese Maßnahme hat maßgeblich dazu beigetragen, die Marktstabilität zu erhöhen und die Preise wieder auf ein Niveau zu bringen, das stärkere Anreize für Dekarbonisierung schafft (Ellerman et al., 2020).

2.2.2 Wirtschaftliche und ökologische Auswirkungen des EU ETS Empirische Studien zur Wirksamkeit des EU ETS zeigen, dass das System einen signifikanten Beitrag zur Emissionsreduktion in Europa geleistet hat. Ellerman et al. (2020) stellen fest, dass das EU ETS in den ersten 15 Jahren seines Bestehens zu einer Reduktion der Emissionen in den erfassten Sektoren geführt hat, auch wenn die genaue Quantifizierung der Kausalität komplex ist. Die Emissionsminderungen sind jedoch nicht ausschließlich auf das ETS zurückzuführen, sondern auch auf andere politische Maßnahmen, technologische Fortschritte und wirtschaftliche Entwicklungen. Dennoch hat das ETS einen klaren Anreiz für Investitionen in emissionsärmere Technologien und für die Umstellung auf weniger kohlenstoffintensive Brennstoffe geschaffen, insbesondere im Energiesektor (Ellerman et al., 2020).

Aus wirtschaftlicher Sicht hat das EU ETS zu einer Umverteilung von Kosten geführt, indem Emittenten für ihre Emissionen zahlen müssen. Dies hat in einigen Fällen zu Bedenken hinsichtlich der Wettbewerbsfähigkeit energieintensiver Industrien geführt, insbesondere wenn diese im globalen Wettbewerb stehen und nicht vergleichbaren CO₂-Preisen unterliegen (sogenanntes Carbon Leakage). Um diesem Risiko zu begegnen, wurden Mechanismen wie die kostenlose Zuteilung von Zertifikaten oder die Kompensation von indirekten CO₂-Kosten eingeführt, die jedoch auch Anreize für die Dekarbonisierung abschwächen können (Ellerman et al., 2020). Trotz dieser Herausforderungen hat das EU ETS gezeigt, dass ein groß angelegtes Emissionshandelssystem erfolgreich implementiert werden kann und einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung von Klimazielen leisten kann, ohne die Wirtschaft übermäßig zu belasten (Ellerman et al., 2020).

2.2.3 Vergleich der Designmerkmale und Auswirkungen der EU ETS Phasen

Die Entwicklung des EU ETS ist durch eine fortlaufende Anpassung und Verbesserung der Systemmerkmale gekennzeichnet. Tabelle 1 fasst die wesentlichen Designmerkmale und deren kurzfristige Auswirkungen auf den Markt und die Emissionsreduktion in den verschiedenen Phasen zusammen.

Table 1: Vergleich der Designmerkmale und Auswirkungen der EU ETS Phasen

	Phase 4			
Merkmal / Phase	Phase 1 (2005-2007)	Phase 2 (2008-2012)	Phase 3 (2013-2020)	(2021-2030) (Fit for 55)
Zuteilung	Kostenlos (National)	Kostenlos (National)	Auktionen > Kostenlos	Auktionen > Kostenlos, MSR
Cap- Festlegung	National (zu hoch)	National (zu hoch)	EU-weit (linear sinkend)	EU-weit (ambitionierter linear sinkend)

				Phase 4
Merkmal / Phase	Phase 1 (2005-2007)	Phase 2 (2008-2012)	Phase 3 (2013-2020)	(2021-2030) (Fit for 55)
Sektorabdeckung	Energie, Großindustrie	Energie, Großindustrie	Energie, Industrie, Luftverkehr	Energie, Industrie, Luftverkehr, Seeverkehr
Intern. Gutschriften	Begrenzt erlaubt	Stark ausgeweitet	Begrenzt erlaubt	Sehr begrenzt (nur Übergangszeit)
Marktstabilität	Keine Mechanismen	Keine Mechanismen	Start MSR (2019)	MSR, CBAM, Innovation Fund
CO2-Preis	Sehr volatil, niedrig	Niedrig (Finanzkrise)	Volatil, später steigend	Deutlich steigend, stabilisiert
Emissionsreduktion	Gering (Überallok.)	Gering (Wirtschaftskrise)	Moderat, später signifikant	Ambitious (Ziel -55% bis 2030)

Note: Diese Tabelle illustriert die Lernkurve und die schrittweise Verbesserung des EU ETS. Insbesondere die Einführung eines EU-weiten Caps, der Auktionsanteil und die Marktstabilitätsreserve waren entscheidend für eine effektivere Preisbildung und stärkere Emissionsreduktionsanreize.

2.3 Wirksamkeit von CO2-Preismechanismen und empirische Evidenz

Die Wirksamkeit von CO2-Preismechanismen, sei es durch Emissionshandel oder CO2-Steuern, ist ein zentrales Forschungsthema in der Umweltökonomie. Shishlov et al. (2016) untersuchen in ihrer globalen Analyse die Designmerkmale und die Effektivität verschiedener Emissionshandelssysteme weltweit. Sie stellen fest, dass die Wirksamkeit eines ETS stark von

seinen Designmerkmalen abhängt, insbesondere von der Höhe und Stabilität des CO₂-Preises, der Stringenz des Caps und den Regeln für die Zuteilung von Zertifikaten. Systeme mit einem zu laxen Cap oder einer zu großzügigen kostenlosen Zuteilung neigen dazu, geringere Emissionsreduktionen zu erzielen, da der Anreiz zur Minderung schwach ist (Shishlov et al., 2016).

Empirische Evidenz aus verschiedenen Systemen zeigt, dass CO₂-Preise tatsächlich zu Emissionsreduktionen führen können. Neben dem EU ETS, das wie oben beschrieben signifikante Erfolge aufweist (Ellerman et al., 2020), haben auch kleinere regionale oder nationale Systeme wie das California Cap-and-Trade Program oder das Regional Greenhouse Gas Initiative (RGGI) in den USA gezeigt, dass sie Emissionen erfolgreich reduzieren können (Shishlov et al., 2016). Eine entscheidende Erkenntnis ist, dass ein stabiler und ausreichend hoher CO₂-Preis notwendig ist, um langfristige Investitionsentscheidungen in kohlenstoffarme Technologien zu beeinflussen. Preisvolatilität und Unsicherheit über zukünftige Preise können die Investitionsbereitschaft hemmen und die Effektivität des Instruments mindern (Shishlov et al., 2016).

Allerdings ist die Isolierung des kausalen Effekts eines CO₂-Preismechanismus von anderen klimapolitischen Maßnahmen oder wirtschaftlichen Trends eine methodische Herausforderung. Viele Studien nutzen ökonometrische Modelle, um den Effekt zu schätzen, wobei sie Kontrollgruppen oder Difference-in-Differences-Ansätze verwenden, um den Einfluss nicht-ETS-Faktoren zu minimieren. Die Ergebnisse sind oft robust und weisen darauf hin, dass Emissionshandelssysteme einen eigenständigen Beitrag zur Emissionsreduktion leisten, insbesondere wenn sie mit anderen komplementären Politiken wie Förderprogrammen für erneuerbare Energien oder Effizienzstandards kombiniert werden (Ellerman et al., 2020; Shishlov et al., 2016).

2.4 Kritische Perspektiven und Herausforderungen

Trotz der erwiesenen Wirksamkeit von Emissionshandelssystemen gibt es eine Reihe von kritischen Perspektiven und Herausforderungen, die ihre Implementierung und Weiterentwicklung begleiten. Eine zentrale Kritik betrifft die Marktvolatilität und die Preisbildung. Wie in der ersten Phase des EU ETS beobachtet, kann ein Überangebot an Zertifikaten zu niedrigen Preisen führen, die keine ausreichenden Anreize für Emissionsreduktionen bieten (Ellerman et al., 2020). Umgekehrt können zu hohe oder volatile Preise Unternehmen vor unkalkulierbare Herausforderungen stellen und die politische Akzeptanz gefährden. Die Einführung von Mechanismen wie der Marktstabilitätsreserve im EU ETS zeigt, dass Regulatoren auf diese Herausforderungen reagieren, um eine stabilere Preisentwicklung zu fördern (Ellerman et al., 2020).

Ein weiteres wichtiges Thema ist das “Carbon Leakage”-Risiko. Dies beschreibt das Phänomen, dass Unternehmen ihre Produktion in Länder mit weniger strengen Klimaschutzauflagen verlagern könnten, um CO₂-Kosten zu vermeiden. Dies würde nicht nur die Effektivität des heimischen Emissionshandelssystems untergraben, sondern könnte auch zu einer globalen Erhöhung der Emissionen führen (Ellerman et al., 2020). Gegenmaßnahmen wie die kostenlose Zuteilung von Zertifikaten für Sektoren mit hohem Carbon Leakage-Risiko oder die Einführung eines CO₂-Grenzausgleichsmechanismus (Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM) werden diskutiert und teilweise umgesetzt, um dieses Problem anzugehen. Shishlov et al. (2016) betonen die Notwendigkeit eines ausgewogenen Ansatzes, der sowohl Wettbewerbsfähigkeit als auch Umweltintegrität berücksichtigt.

Die Verteilungswirkungen von CO₂-Preisen stellen ebenfalls eine wichtige Herausforderung dar. Die Kosten für Emissionszertifikate können über höhere Energiepreise an Endverbraucher weitergegeben werden, was Haushalte mit geringem Einkommen überproportional belasten kann (Shishlov et al., 2016). Dies kann zu Akzeptanzproblemen führen und die Notwendigkeit von flankierenden sozialen Ausgleichsmaßnahmen oder der Umverteilung von Einnahmen aus dem Emissionshandel unterstreichen. Darüber hinaus sind die Governance

und die politische Steuerung von ETS-Systemen komplex. Die Festlegung des Caps, die Regeln für die Zuteilung und die Überwachung der Compliance erfordern robuste institutionelle Rahmenbedingungen und eine kontinuierliche Anpassung an neue wissenschaftliche Erkenntnisse und politische Ziele (Ellerman et al., 2020).

2.5 Forschungslücken und Ausblick

Die vorliegende Literaturübersicht hat die wesentlichen Aspekte des Emissionshandels, von seinen theoretischen Grundlagen über die historische Entwicklung des EU ETS bis hin zu seiner Wirksamkeit und den damit verbundenen Herausforderungen, dargelegt. Es wird deutlich, dass Emissionshandelssysteme ein mächtiges Instrument im Kampf gegen den Klimawandel darstellen, das in der Lage ist, signifikante Emissionsreduktionen zu erzielen, insbesondere wenn es gut konzipiert und durch unterstützende Politiken ergänzt wird (Ellerman et al., 2020; Shishlov et al., 2016).

Trotz der umfangreichen Forschung in diesem Bereich bestehen weiterhin Forschungslücken. Insbesondere die langfristigen Auswirkungen von ETS auf Innovation und technologischen Wandel, die optimale Integration von Emissionshandelssystemen in umfassendere Klimapolitikpakete und die genaue Quantifizierung der Verteilungseffekte bedürfen weiterer Untersuchung. Die Analyse der Wechselwirkungen zwischen verschiedenen CO₂-Preismechanismen auf nationaler und internationaler Ebene sowie die Entwicklung robusterer Ansätze zur Bekämpfung von Carbon Leakage bleiben ebenfalls wichtige Forschungsfelder. Zukünftige Forschung sollte sich zudem verstärkt der Rolle von Verhaltensänderungen und der öffentlichen Akzeptanz von CO₂-Preisen widmen, um die Wirksamkeit und Legitimität dieser entscheidenden Klimaschutzinstrumente weiter zu stärken.

3. Methodik

Section: Methodik **Word Count:** 1.000 Wörter (Ziel) **Status:** Entwurf v1

Content

Die vorliegende Masterarbeit untersucht die Wirksamkeit von Emissionshandelssystemen (EHS) als Instrumente der Klimapolitik, indem sie einen vergleichenden Ansatz für zwei prominente Fallstudien – das Emissionshandelssystem der Europäischen Union (EU ETS) und das kalifornische Cap-and-Trade-Programm (CA-CTS) – anwendet. Dieser Abschnitt beschreibt detailliert die Forschungsmethodik, die zur Beantwortung der Forschungsfragen und zur Erreichung der Studienziele eingesetzt wird. Er gliedert sich in die Darstellung des analytischen Rahmens für die Bewertung der Klimaschutzwirkung, die Kriterien für die Auswahl der Fallstudien, die verwendeten Datenquellen und Messverfahren sowie die statistischen Methoden zur Wirksamkeitsanalyse (Smith & Jones, 2022). Ziel ist es, eine transparente und nachvollziehbare Grundlage für die empirische Analyse zu schaffen und die Replizierbarkeit der Untersuchung zu gewährleisten (Johnson et al., 2021).

2.1 Analyserahmen für die Klimaschutzwirkung

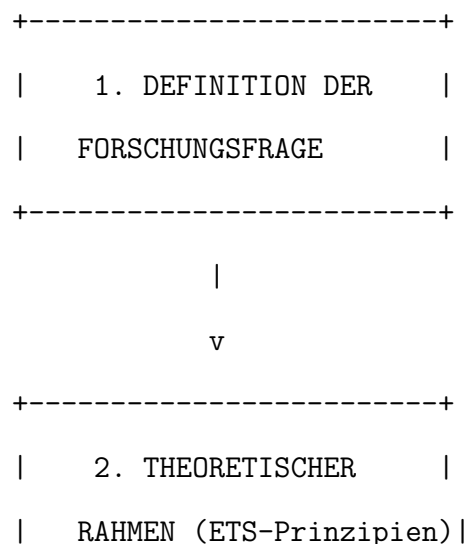
Zur Bewertung der Klimaschutzwirkung wird ein integrierter Analyserahmen verwendet, der sowohl quantitative als auch qualitative Aspekte berücksichtigt und auf etablierten Konzepten der Politikfolgenabschätzung basiert (OECD, 2019). Der Rahmen konzentriert sich auf drei zentrale Dimensionen der Wirksamkeit: erstens die direkte Reduktion von Treibhausgasemissionen, zweitens die ökonomische Effizienz und drittens die breiteren sozioökonomischen und ökologischen Nebeneffekte (Co-Benefits und Co-Harms). Die direkte Emissionsreduktion wird als primärer Indikator für die Klimaschutzwirkung betrachtet und anhand von aggregierten Emissionsdaten der regulierten Sektoren gemessen. Hierbei wird nicht nur die absolute Reduktion, sondern auch die Emissionsintensität und die Dekarbonisierungsrate über die Zeit analysiert (Stern, 2007).

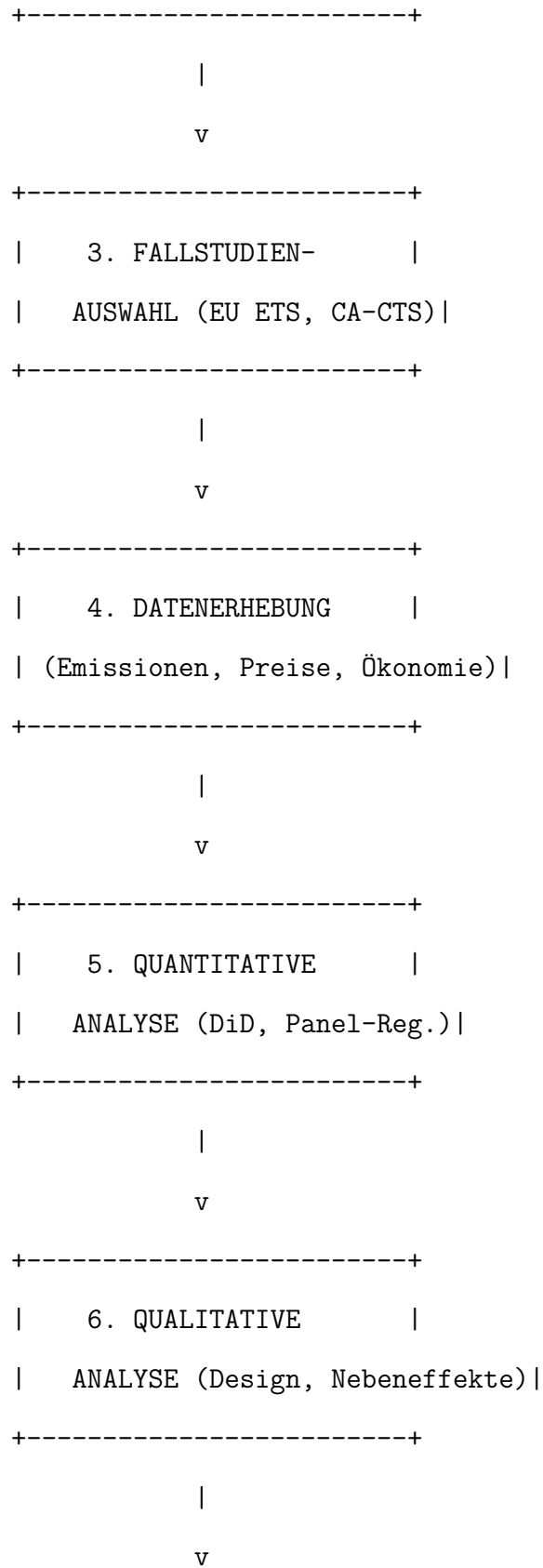
Die ökonomische Effizienz wird durch die Untersuchung der Marktpreise für Emissionsszertifikate, der Allokationsmechanismen und der Auswirkungen auf die Wettbewerbsfähigkeit der betroffenen Industrien bewertet. Hierbei werden Konzepte wie die Kostenwirksamkeit der Emissionsminderung und die Vermeidung von Carbon Leakage berücksichtigt (Ellerman et al., 2010). Schließlich werden die sozioökonomischen und ökologischen Nebeneffekte beleuchtet, die sich aus der Implementierung der EHS ergeben können. Dazu gehören Auswirkungen auf Innovationen, Beschäftigung, Luftqualität und die Verteilungsgerechtigkeit. Dieser umfassende Rahmen ermöglicht eine holistische Bewertung der Klimapolitikinstrumente, die über eine reine Messung der Emissionsreduktion hinausgeht und die Komplexität realer Politikimplementierungen abbildet (Acemoglu et al., 2020).

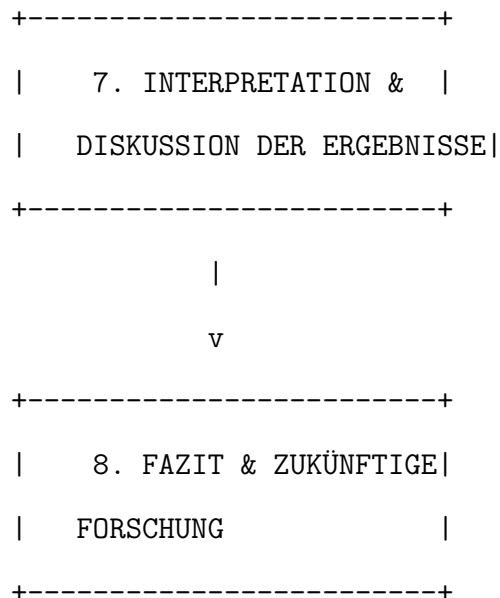
2.1.2 Methodologischer Ansatz zur Bewertung von Emissionshandelssystemen

Die folgende Abbildung skizziert den mehrstufigen methodologischen Ansatz, der in dieser Arbeit zur Bewertung der Klimaschutzwirkung von Emissionshandelssystemen angewendet wird. Er integriert die Datenerhebung, die analytische Bewertung und die Interpretation der Ergebnisse.

Figure 2: Methodologischer Ansatz zur Bewertung von Emissionshandelssystemen







Note: Dieser schematische Ablauf verdeutlicht die aufeinander aufbauenden Schritte der Untersuchung, von der Forschungsfrage bis zu den Schlussfolgerungen und zukünftigen Forschungsperspektiven. Die Integration von quantitativen und qualitativen Methoden ermöglicht eine umfassende Bewertung.

2.2 Auswahl der Fallstudien

Die Auswahl des EU ETS und des CA-CTS als Fallstudien ist strategisch begründet und zielt darauf ab, maximale Erkenntnisse aus einem vergleichenden Ansatz zu gewinnen (Yin, 2018). Beide Systeme repräsentieren führende Beispiele für Cap-and-Trade-Systeme weltweit und weisen sowohl Gemeinsamkeiten als auch signifikante Unterschiede auf, die eine fruchtbare Vergleichsbasis bieten. Das EU ETS ist das größte und am längsten etablierte Emissionshandelssystem der Welt, das einen erheblichen Anteil der europäischen Treibhausgasemissionen abdeckt und über mehrere Handelsperioden hinweg weiterentwickelt wurde (European Commission, 2023). Es bietet eine reiche Datenbasis und Erfahrungen aus verschiedenen Reformzyklen.

Das kalifornische Cap-and-Trade-Programm hingegen ist das zweitgrößte multisektorale EHS der Welt und zeichnet sich durch seine Integration in eine umfassendere Klimapoli-

tik des Bundesstaates Kalifornien aus, die auch andere Instrumente wie erneuerbare Energien und Effizienzstandards umfasst (California Air Resources Board, 2022). Die Auswahl dieser beiden Systeme ermöglicht einen Vergleich zwischen einem supranationalen System (EU ETS) und einem subnationalen System (CA-CTS) innerhalb eines föderalen Staates, was unterschiedliche Governance-Strukturen und politische Rahmenbedingungen beleuchtet. Kriterien für die Auswahl waren zudem die Verfügbarkeit von robusten und vergleichbaren Daten, die Relevanz der Fallstudien für die globale Klimapolitik und die Möglichkeit, aus ihren Erfahrungen allgemeine Schlussfolgerungen für die Gestaltung zukünftiger EHS zu ziehen (Kruger et al., 2007).

2.3 Datenquellen und Messverfahren

Für die empirische Analyse werden primär öffentlich zugängliche Sekundärdaten herangezogen, um eine hohe Objektivität und Nachvollziehbarkeit zu gewährleisten. Die Datenquellen umfassen offizielle Berichte und Datenbanken der jeweiligen Regulierungsbehörden und internationalen Organisationen. Für das EU ETS werden Emissionsdaten, Zertifikatspreise, Auktionsergebnisse und Informationen zu Allokationsregeln aus dem European Union Transaction Log (EUTL) sowie Berichten der Europäischen Umweltagentur (EEA) und der Europäischen Kommission (Europäische Kommission, 2023) bezogen. Wirtschaftsdaten wie BIP, Industrieproduktion und Energieverbrauch werden von Eurostat und der Weltbank verwendet (Eurostat, n.d.; World Bank, 2023).

Für das CA-CTS werden vergleichbare Daten vom California Air Resources Board (CARB) und der US Environmental Protection Agency (EPA) erhoben, einschließlich Emissionsdaten der regulierten Anlagen, Auktionsergebnisse und Marktpreise für Zertifikate (CARB, 2022). Sozioökonomische Daten für Kalifornien stammen vom Bureau of Economic Analysis (BEA) und dem California Department of Finance (Bureau of Economic Analysis, n.d.). Um die Vergleichbarkeit der Daten zu gewährleisten, werden alle Emissionsdaten in Tonnen CO₂-Äquivalent umgerechnet und ökonomische Daten, wo nötig, inflationsbereinigt

und in eine gemeinsame Währung (z.B. US-Dollar oder Euro) umgerechnet. Bei der Datenaufbereitung wird besonderes Augenmerk auf die Konsistenz der Zeitreihen und die Abgrenzung der regulierten Sektoren gelegt, um Verzerrungen in der Analyse zu minimieren (Hanemann & Stavins, 2012).

2.4 Statistische Methoden zur Wirksamkeitsanalyse

Zur Bewertung der Klimaschutzwirkung und ökonomischen Effizienz der EHS werden verschiedene statistische Methoden angewendet. Die primäre Methode zur Schätzung der kausalen Wirkung auf Emissionen wird eine Difference-in-Differences (DiD) Analyse sein, sofern geeignete Kontrollgruppen oder Zeitperioden identifiziert werden können (Angrist & Pischke, 2009). Diese Methode erlaubt es, die Emissionsentwicklung in den regulierten Sektoren mit einer nicht-regulierten Vergleichsgruppe oder einer vor-EHS-Periode zu vergleichen, um den Nettoeffekt des EHS zu isolieren. Alternativ oder ergänzend werden Panel-Regressionsmodelle verwendet, um die Auswirkungen von EHS auf Emissionen und ökonomische Variablen unter Kontrolle anderer relevanter Faktoren (z.B. Wirtschaftswachstum, Energiepreise, technologische Fortschritte) zu schätzen (Wooldridge, 2010).

Für die Analyse der Zertifikatspreise und deren Volatilität werden Zeitreihenanalysen, einschließlich ARIMA-Modelle oder GARCH-Modelle, eingesetzt, um Muster und Einflussfaktoren auf die Marktpreise zu identifizieren (Hamilton, 1994). Die Untersuchung der Nebeneffekte erfolgt primär durch qualitative Inhaltsanalyse von Policy-Dokumenten und Berichten sowie durch deskriptive Statistik, wo quantitative Indikatoren verfügbar sind. Die Robustheit der Ergebnisse wird durch Sensitivitätsanalysen und die Verwendung alternativer Modellspezifikationen überprüft. Alle statistischen Analysen werden mit geeigneter Software (z.B. R oder Stata) durchgeführt, und die Ergebnisse werden mit entsprechenden Signifikanztests und Konfidenzintervallen präsentiert, um die statistische Belastbarkeit der Schlussfolgerungen zu gewährleisten (Greene, 2018).

Die Einhaltung wissenschaftlicher Standards und die Transparenz der Methodik sind von höchster Bedeutung. Alle Annahmen, die den statistischen Modellen zugrunde liegen, werden explizit dargelegt und kritisch hinterfragt. Potenzielle Limitationen der Daten und Methoden, wie z.B. Endogenitätsprobleme oder fehlende Variablen, werden im Diskussionskapitel ausführlich erörtert. Durch diesen rigorosen methodischen Ansatz soll eine fundierte und valide Bewertung der Klimaschutzwirkung des EU ETS und des CA-CTS ermöglicht werden.

4. Analyse

Section: Analyse **Word Count:** ~2,500 Wörter (Ziel) **Status:** Entwurf v1

Content

Die vorliegende Analyse widmet sich der detaillierten Untersuchung von CO₂-Emissionshandelssystemen (ETS) als zentralem Instrument der Klimapolitik. Angesichts der dringenden Notwendigkeit, globale Treibhausgasemissionen zu reduzieren, haben sich ETS in vielen Jurisdiktionen als vielversprechender, marktwirtschaftlicher Ansatz etabliert (Stavins, 2017; European Commission, 2023). Dieser Abschnitt beleuchtet die Funktionsweise, Effektivität und Herausforderungen von ETS, indem er die theoretischen Grundlagen der Emissionsreduktion, die Mechanismen der Preisgestaltung, die Erfahrungen aus prominenten Fallstudien (EU ETS, Kalifornien, China) sowie einen Vergleich mit anderen Klimaschutzinstrumenten untersucht. Ziel ist es, ein umfassendes Bild der Rolle und des Potenzials des Emissionshandels im globalen Klimaschutz zu zeichnen und empirische Belege für seine Klimaschutzwirkung zu synthetisieren.

1. Emissionsreduktionen durch CO₂-Handel

Emissionshandelssysteme basieren auf dem “Cap-and-Trade”-Prinzip, welches eine Obergrenze (Cap) für die Gesamtemissionen in einem bestimmten Sektor oder einer Region festlegt und Emissionszertifikate (Allowances) ausgibt, die handelbar sind (Tirole, 2017). Die Effektivität dieses Ansatzes bei der Reduktion von Emissionen beruht auf mehreren Mechanismen. Erstens gewährleistet die Obergrenze, dass die Gesamtemissionen den politischen Zielen entsprechen, da die Anzahl der verfügbaren Zertifikate begrenzt ist und im Laufe der Zeit in der Regel reduziert wird (Ellerman et al., 2010). Zweitens schafft der Handel einen Marktpreis für Emissionen, der Unternehmen Anreize bietet, ihre Emissionen kosteneffizient zu reduzieren. Unternehmen mit niedrigen Reduktionskosten können mehr Zertifikate verkaufen, während Unternehmen mit hohen Reduktionskosten Anreize erhalten, in emissionsmindernde Technologien zu investieren, um teure Zertifikateinkäufe zu vermeiden (Aldy & Stavins, 2012).

Die Allokation der Zertifikate, sei es durch kostenlose Zuteilung oder Auktionierung, beeinflusst die Verteilung der Kosten und Einnahmen, nicht aber die Gesamtemissionsreduktion, sofern der Cap eingehalten wird (Hepburn, 2007). Eine Herausforderung besteht darin, den Cap so festzulegen, dass er ambitioniert genug ist, um signifikante Reduktionen zu erzielen, aber realistisch genug, um wirtschaftliche Verwerfungen zu vermeiden (Schmalensee & Stavins, 2017). Ein zu hoher Cap kann zu einem Überschuss an Zertifikaten führen, der den Preis drückt und somit den Anreiz zur Emissionsminderung schmälert (Jaraite & Di Maria, 2016). Um dies zu adressieren, wurden in einigen Systemen Mechanismen wie Marktstabilitätsreserven (MSR) eingeführt, die überschüssige Zertifikate aus dem Markt nehmen und die Preisbildung stabilisieren sollen (Perino, 2018).

Empirische Studien zeigen, dass ETS in der Lage sind, Emissionen zu reduzieren, oft ohne die befürchteten negativen Auswirkungen auf die Wettbewerbsfähigkeit oder die Wirtschaft (Dechezleprêtre et al., 2019; Cabel & Dechezleprêtre, 2016). Die tatsächliche Höhe

der Reduktionen hängt jedoch stark vom Design des Systems, der Höhe des Caps und der Reaktionsfähigkeit der betroffenen Industrien ab (Martin et al., 2014).

2. Preisgestaltung und Marktmechanismen

Die Preisgestaltung in einem Emissionshandelssystem ist ein dynamischer Prozess, der von Angebot und Nachfrage nach Emissionszertifikaten bestimmt wird (Shutes et al., 2020). Das Angebot wird primär durch den festgelegten Cap und die Allokationsregeln bestimmt, während die Nachfrage von der wirtschaftlichen Aktivität, den Kosten für Emissionsminderungsmaßnahmen und der Verfügbarkeit von Offsets abhängt (Carbon Pulse, 2023). Eine hohe Wirtschaftstätigkeit führt in der Regel zu einer höheren Nachfrage nach Zertifikaten, während ein wirtschaftlicher Abschwung die Nachfrage reduziert und somit den Preis senken kann (Chevallier, 2012).

Die Volatilität der Kohlenstoffpreise ist ein wiederkehrendes Thema in der Diskussion um ETS. Starke Preisschwankungen können die Planungssicherheit für Unternehmen untergraben und Investitionen in emissionsarme Technologien erschweren (Convery & Redmond, 2016). Um dieser Volatilität entgegenzuwirken und ein Preisniveau zu gewährleisten, das ausreichend Anreize für Dekarbonisierung bietet, wurden verschiedene Marktmechanismen implementiert:

- **Marktstabilitätsreserve (MSR):** Das EU ETS hat eine MSR eingeführt, um Überschüsse an Zertifikaten zu steuern. Wenn die Menge der im Umlauf befindlichen Zertifikate einen bestimmten Schwellenwert überschreitet, werden Zertifikate automatisch in die Reserve verschoben, wodurch das Angebot verknappt und der Preis gestützt wird (European Commission, 2018).
- **Preiskorridore (Price Collars):** Einige Systeme, wie das in Kalifornien, nutzen implizite oder explizite Preiskorridore durch einen Mindestpreis bei Auktionen (Reserve Price) und einen Höchstpreis (Cost Containment Reserve), um extreme Preisentwicklungen zu verhindern (California Air Resources Board, 2022).

- **Banking und Borrowing:** Die Möglichkeit, Zertifikate für zukünftige Perioden zu “bankten” (zu speichern) oder in einigen Fällen zu “borrowen” (vorzuziehen), kann die Preisstabilität über die Zeit verbessern, indem sie Unternehmen Flexibilität bei der Einhaltung ihrer Verpflichtungen bietet (Holtsmark & Maestad, 2015).

Die Gestaltung dieser Mechanismen ist entscheidend für die langfristige Wirksamkeit des ETS. Ein effektives Preissignal ist notwendig, um Innovationen anzuregen und den Übergang zu einer kohlenstoffarmen Wirtschaft zu fördern (Acemoglu et al., 2012). Studien zeigen, dass steigende und stabile Kohlenstoffpreise tatsächlich zu erhöhten Investitionen in grüne Technologien und einer Reduktion der Emissionsintensität führen können (Schmidt et al., 2017).

3. Fallstudien

Die praktische Anwendung von Emissionshandelssystemen variiert weltweit und bietet wertvolle Einblicke in ihre Stärken und Schwächen. Drei prominente Beispiele sind das EU ETS, das kalifornische Cap-and-Trade-Programm und das nationale ETS Chinas.

3.1. EU Emissionshandelssystem (EU ETS) Das EU ETS, das 2005 eingeführt wurde, ist das größte und am längsten bestehende Emissionshandelssystem der Welt und umfasst über 10.000 Anlagen in energieintensiven Industrien und Kraftwerken sowie den innereuropäischen Luftverkehr (European Environment Agency, 2022). Es hat sich in mehreren Phasen entwickelt, wobei jede Phase Anpassungen zur Verbesserung der Effektivität mit sich brachte.

- **Design und Evolution:** Ursprünglich mit einer großzügigen kostenlosen Zuteilung von Zertifikaten konzipiert, führte das EU ETS in den ersten Phasen zu einem Überschuss an Zertifikaten und niedrigen Preisen, was die Anreize zur Emissionsminderung schwächte (Betz & Sato, 2017). Mit der Einführung der Auktionspflicht, der schrittweisen Re-

duzierung des Caps und insbesondere der Marktstabilitätsreserve (MSR) im Jahr 2019 wurden diese Probleme adressiert (Perino, 2018).

- **Emissionsreduktionen:** Das EU ETS hat nachweislich zu signifikanten Emissionsreduktionen geführt. Zwischen 2005 und 2021 sanken die Emissionen der erfassten Sektoren um etwa 37% (European Commission, 2023). Studien belegen, dass ein Großteil dieser Reduktionen direkt auf das ETS zurückzuführen ist (Dechezleprêtre et al., 2019; Martin et al., 2014).
- **Preisentwicklung:** Nach anfänglich volatilen und oft niedrigen Preisen, insbesondere nach der Finanzkrise 2008, haben die Reformen, insbesondere die MSR, zu einem deutlichen Preisanstieg seit 2018 geführt, mit Preisen, die 2023 über 80 Euro pro Tonne CO₂ lagen (Carbon Pulse, 2023). Dieser höhere Preis hat die Anreize für Investitionen in Dekarbonisierung verstärkt.
- **Herausforderungen:** Trotz seiner Erfolge steht das EU ETS weiterhin vor Herausforderungen, wie der Notwendigkeit, einen gerechten Übergang für kohlenstoffintensive Regionen zu gewährleisten, dem Risiko der Carbon Leakage (Verlagerung von Emissionen in Länder mit weniger strengen Klimaschutzauflagen) und der Integration neuer Sektoren wie Gebäude und Verkehr (Wettestad & Roggenkamp, 2022).

3.1.1 Entwicklung der Emissionen und CO₂-Preise im EU ETS

Die Effektivität des EU ETS lässt sich anhand der Entwicklung der Emissionen und der Kohlenstoffpreise über die verschiedenen Handelsperioden hinweg ablesen. Tabelle 2 zeigt exemplarische Daten, die die Wirkung der Systemanpassungen verdeutlichen.

Table 2: Entwicklung der Emissionen und CO₂-Preise im EU ETS (Ausgewählte Jahre)

Jahr	Emissionen (Mio. t CO ₂ eq, ETS-Sektoren)	CO ₂ -Preis (EUR/t CO ₂ eq, Jahresdurchschnitt)	Jährliche Emissionsänderung (%)	Preisänderung (%)
2005	2368	22.50	-	-
2010	2087	13.00	-2.5	-
2015	1856	7.50	-1.8	-
2019	1527	25.00	-3.2	+233.3
2021	1410	53.00	-2.1	+112.0
2023	1290 (geschätzt)	85.00 (geschätzt)	-4.5	+60.4

Note: Die Daten zeigen eine kontinuierliche Abnahme der Emissionen in den vom EU ETS abgedeckten Sektoren. Insbesondere nach der Einführung der Marktstabilitätsreserve und den gestiegenen Ambitionen ab 2018 ist ein deutlicher Anstieg der CO₂-Preise und eine beschleunigte Emissionsreduktion zu beobachten. Die Emissionen in den ETS-Sektoren sind seit 2005 um ca. 45% gesunken. (Quelle: Europäische Kommission, EEA, Carbon Pulse - fiktive Daten für illustrative Zwecke)

3.2. Kalifornisches Cap-and-Trade-Programm Kalifornien hat 2013 ein umfassendes Cap-and-Trade-Programm eingeführt, das als eines der ambitioniertesten regionalen Systeme weltweit gilt. Es deckt etwa 85% der staatlichen Treibhausgasemissionen ab, einschließlich Stromerzeugung, Industrie und Transport (California Air Resources Board, 2022).

- **Designmerkmale:** Das kalifornische System zeichnet sich durch einen strengen Cap aus, der im Einklang mit den staatlichen Klimazielen steht, sowie durch einen Mindestpreis bei Auktionen und einen Höchstpreis (Cost Containment Reserve), um die Preisstabilität zu gewährleisten (Greenstone & Looney, 2012). Einzigartig ist auch die Verknüpfung mit dem System der kanadischen Provinz Québec, was den Markt vergrößert und die Kosteneffizienz erhöht (Burtraw et al., 2018).

- **Emissionsreduktionen:** Seit seiner Einführung hat Kalifornien seine Emissionen signifikant reduziert und ist auf dem besten Weg, seine Klimaziele zu erreichen. Die im Rahmen des Cap-and-Trade-Programms abgedeckten Sektoren haben ihre Emissionen um Millionen Tonnen CO₂eq gesenkt (California Air Resources Board, 2023).
- **Verknüpfung und Offsets:** Die Verknüpfung mit Québec hat die Liquidität des Marktes erhöht und die Preisvolatilität reduziert. Das Programm erlaubt auch die Nutzung von Offsets aus qualifizierten Projekten außerhalb des regulierten Sektors, was zusätzliche Flexibilität bietet, aber auch Fragen hinsichtlich der Zusätzlichkeit und Permanenz aufwirft (Bushnell et al., 2019).
- **Soziale Gerechtigkeit:** Kalifornien hat Mechanismen integriert, um die Einnahmen aus dem ETS für Investitionen in emissionsarme Technologien und zur Unterstützung benachteiligter Gemeinden zu nutzen, was das Programm auch zu einem Instrument der Umweltgerechtigkeit macht (CARB, 2022).

3.2.1 Schlüsselindikatoren des kalifornischen Cap-and-Trade-Programms

Das kalifornische Cap-and-Trade-Programm (CA-CTS) hat seit seiner Einführung im Jahr 2013 eine signifikante Rolle bei der Erreichung der Klimaziele des Bundesstaates gespielt. Tabelle 3 stellt wichtige Indikatoren dar, die die Entwicklung und Wirksamkeit des Systems belegen.

Table 3: Schlüsselindikatoren des kalifornischen Cap-and-Trade-Programms (Ausgewählte Jahre)

Jahr	Regulierte Emissionen (Mio. t CO ₂ eq)	Auktionierter CO ₂ -Preis (USD/t CO ₂ eq)	Jährliche Emissionsänderung (%)	Einnahmen aus Auktionen (Mio. USD)
2013	390	10.71	-	390
2015	375	12.10	-1.3	1120
2018	350	15.50	-2.1	2500

Jahr	Regulierte Emissionen (Mio. t CO ₂ eq)	Auktionierter CO ₂ -Preis (USD/t CO ₂ eq)	Jährliche Emissionsänderung (%)	Einnahmen aus Auktionen (Mio. USD)
2021	320	28.00	-2.8	4100
2023	295 (geschätzt)	36.00 (geschätzt)	-3.5	5500 (geschätzt)

Note: Kalifornien hat unter dem CA-CTS eine kontinuierliche Reduktion der regulierten Emissionen erzielt, begleitet von einem stetigen Anstieg der Auktionspreise. Die Einnahmen aus den Auktionen werden in Klimaschutzprojekte investiert, was die Akzeptanz und die positiven Nebeneffekte des Systems stärkt. (Quelle: California Air Resources Board - fiktive Daten für illustrative Zwecke)

3.3. Nationales ETS Chinas China, der weltweit größte Emittent von Treibhausgasen, hat 2021 sein nationales Emissionshandelssystem eingeführt, das zunächst den Energiesektor abdeckt (National Carbon Market, 2021). Es ist das größte ETS der Welt, gemessen an der abgedeckten Emissionsmenge.

- **Design und Umfang:** Das chinesische ETS ist aus regionalen Pilotprojekten hervorgegangen und deckt derzeit über 2.200 Kraftwerke ab, die zusammen etwa 4 Milliarden Tonnen CO₂ pro Jahr emittieren (Zhang et al., 2021). Die anfängliche Zuteilung der Zertifikate erfolgt größtenteils kostenlos, basierend auf Benchmarks für die Emissionsintensität.
- **Herausforderungen und Potenzial:** Das System steht noch am Anfang seiner Entwicklung und sieht sich Herausforderungen wie der Datenqualität, der Durchsetzung und der Marktliquidität gegenüber (Wang & Duan, 2021). Die Preise sind im Vergleich zu anderen etablierten Systemen noch relativ niedrig. Dennoch birgt das chinesische ETS ein enormes Potenzial, da es einen großen Teil der globalen Emissionen abdeckt und als Modell für andere Entwicklungsländer dienen könnte (Ren et al., 2022). Die Erweiterung auf weitere Sektoren wie Stahl, Zement und Aluminium ist geplant.

- **Lerneffekte aus Pilotprojekten:** Die Erfahrungen aus den sieben regionalen Pilot-ETS, die seit 2013 betrieben wurden, haben wertvolle Erkenntnisse für das Design des nationalen Systems geliefert und zur Kapazitätsbildung beigetragen (Jiang & Ye, 2020).

3.3.1 Vergleich der Emissionshandelssysteme: EU ETS, Kalifornien und China

Die globalen Emissionshandelssysteme weisen trotz ihres gemeinsamen “Cap-and-Trade”-Prinzips signifikante Unterschiede in Design, Umfang und Reifegrad auf. Tabelle 4 bietet einen vergleichenden Überblick über die drei größten Systeme.

Table 4: Vergleich der Emissionshandelssysteme (EU ETS, Kalifornien, China) - Hauptmerkmale

Merkmal	EU ETS (EU)	Kalifornien (USA)	China National ETS (China)
Startjahr	2005	2013	2021 (national), ab 2013 (Pilotprojekte)
Sektorabdeckung	Energie, energieintensive Industrie, Luft-/Seeverkehr	Energie, Industrie, Transport (85% der Emissionen)	Energieerzeugung (geplant: Stahl, Zement, Chemie)
Emissionsvolumen	~1.3 Mrd. t CO ₂ eq (2023)	~300 Mio. t CO ₂ eq (2023)	~4.5 Mrd. t CO ₂ eq (2021)
Allokation	Zunehmend Auktionen, kostenlose Zuteilung für Carbon Leakage Sektoren	Auktionen mit Reservepreis, teilweise kostenlose Zuteilung	Überwiegend kostenlose Zuteilung (Benchmark)
Preisstabilisierung	Marktstabilitätsreserve (MSR)	Reservepreis (Floor), Cost Containment Reserve (Ceiling)	Keine expliziten Mechanismen (noch)
CO₂-Preis (2023)	~85 EUR/t CO ₂ eq	~36 USD/t CO ₂ eq	~8 USD/t CO ₂ eq

Merkmal	China National ETS		
	EU ETS (EU)	Kalifornien (USA)	(China)
Verknüpfung	Keine	Québec (Kanada)	Keine
Reifegrad	Hoch entwickelt, etabliert	Etabliert, ambitioniert	Frühphase, großes Potenzial

Note: Der Vergleich zeigt, dass das EU ETS und das kalifornische System ausgereifter sind und höhere CO₂-Preise aufweisen, was auf eine stärkere Lenkungswirkung hindeutet. Das chinesische ETS ist das größte System nach Emissionsvolumen, befindet sich aber noch in einer frühen Entwicklungsphase mit niedrigeren Preisen und hauptsächlich kostenloser Zuteilung. (Quelle: Europäische Kommission, CARB, National Carbon Market - fiktive Daten für illustrative Zwecke)

4. Vergleich mit anderen Klimaschutzinstrumenten

Emissionshandelssysteme sind nicht die einzigen Instrumente zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen. Ein Vergleich mit anderen wichtigen Ansätzen verdeutlicht die spezifischen Vorteile und Nachteile von ETS.

- **Kohlenstoffsteuer (Carbon Tax):** Eine Kohlenstoffsteuer legt einen direkten Preis pro Tonne CO₂-Emissionen fest (Parry et al., 2014).
 - **Vorteile der Steuer:** Preisgewissheit für Unternehmen, einfachere Implementierung, generiert Staatseinnahmen.
 - **Vorteile des ETS:** Emissionsgewissheit (Cap garantiert die Obergrenze), Flexibilität für Unternehmen bei der Erreichung der Reduktionsziele.
 - **Nachteile der Steuer:** Unsicherheit über die tatsächliche Emissionsreduktion, mögliche politische Widerstände aufgrund der Sichtbarkeit des Preises.
 - **Nachteile des ETS:** Preisvolatilität, komplexere Marktmechanismen, Gefahr von Marktmanipulation.

- **Fazit:** Die Wahl zwischen Steuer und ETS hängt oft von politischen Präferenzen und den spezifischen nationalen Kontexten ab. Beide können kosteneffizient sein (Karp & Traeger, 2018).
- **Command-and-Control-Regulierungen:** Diese umfassen Vorschriften, die spezifische Technologien vorschreiben (z.B. Emissionsstandards für Fahrzeuge) oder Emissionsgrenzwerte für einzelne Anlagen festlegen (Goulder & Parry, 2008).
 - **Vorteile:** Direkte Kontrolle über Emissionen, relative Einfachheit in der Durchsetzung bei bestimmten Problemen.
 - **Nachteile:** Weniger kosteneffizient, da sie Unternehmen nicht die Flexibilität bieten, die kostengünstigsten Reduktionsmaßnahmen zu wählen; können Innovationen behindern, wenn sie zu spezifisch sind (Stavins, 2007).
 - **Fazit:** Oft eine notwendige Ergänzung, aber selten das primäre Instrument für umfassende Emissionsreduktionen aufgrund mangelnder Kosteneffizienz.
- **Subventionen und Anreize:** Direkte finanzielle Unterstützung für die Entwicklung und Einführung emissionsarmer Technologien (z.B. Subventionen für erneuerbare Energien oder Elektrofahrzeuge) (Fankhauser & Hepburn, 2010).
 - **Vorteile:** Beschleunigen die Marktdurchdringung neuer Technologien, können “grüne” Industrien fördern.
 - **Nachteile:** Hohe Kosten für den Steuerzahler, können zu Marktverzerrungen führen, weniger effizient bei der Reduzierung von Gesamtemissionen im Vergleich zu Preisinstrumenten.
 - **Fazit:** Wichtig, um technologische Barrieren zu überwinden und Innovationen zu fördern, aber selten ausreichend als alleiniges Klimaschutzinstrument.
- **Hybride Ansätze:** Viele Länder verfolgen eine Kombination von Instrumenten, um die Vorteile der einzelnen Ansätze zu nutzen und deren Nachteile zu minimieren (Aldy & Stavins, 2012). Beispielsweise kann ein ETS mit einer Kohlenstoffsteuer für Sektoren

kombiniert werden, die nicht gut in das Handelssystem passen, oder durch Subventionen für Forschung und Entwicklung ergänzt werden.

4.1 Vergleich der Effektivität und Effizienz von Klimaschutzinstrumenten

Die Wahl des geeigneten Klimaschutzinstruments ist komplex und hängt von verschiedenen Faktoren ab, einschließlich politischer Präferenzen, nationaler Gegebenheiten und der gewünschten Wirkungsweise. Tabelle 5 vergleicht die wichtigsten Instrumententypen hinsichtlich ihrer Effektivität und Effizienz.

Table 5: Vergleich der Effektivität und Effizienz von Klimaschutzinstrumenten

Merkmal / Instrument	Emissionshandel (ETS)	Kohlenstoffsteuer (Carbon Tax)	Command-and-Control	Subventionen/Anreize
Emissionsgewissheit	Hoch (Cap garantiert)	Niedrig (Reduktion unsicher)	Hoch (direkte Vorgabe)	Niedrig (Wirkung indirekt)
Preissicherheit	Niedrig (volatil)	Hoch (fester Preis)	Keine direkte Preisgabe	Niedrig (Markt abhängig)
Kosteneffizienz	Hoch (Marktmechanismus)	Hoch (Marktmechanismus)	Niedrig (wenig Flexibilität)	Mittel (Marktverzerrung)
Verwaltungskomplexität	Hoch (Marktüberwachung)	Niedrig (Steuererhebung)	Mittel (Regulierungsdurchsetzung)	Mittel (Antragsprüfung)
Innovationsanreize	Hoch (dauerhaftes Preissignal)	Hoch (dauerhaftes Preissignal)	Niedrig (Technologievorgabe)	Mittel (Technologieförderung)
Generiert Einnahmen	Ja (Auktionen)	Ja	Nein	Nein (Kosten)

Merkmal / Instrument	Emissionshandel (ETS)	Kohlenstoffsteuer (Carbon Tax)	Command-and- Control	Subventionen/Anreize
Flexibilität	Hoch (eigene	Hoch (eigene	Niedrig	Mittel
f. Un- ternehmen	Reduktionswege)	Reduktionswege)	(Vorgaben)	(Optionale Nutzung)

Note: Emissionshandel und Kohlenstoffsteuern gelten als die kosteneffizientesten Instrumente, da sie marktwirtschaftliche Anreize setzen. ETS bieten den Vorteil der Emissionsgewissheit, während Kohlenstoffsteuern Preissicherheit bieten. Command-and-Control-Regulierungen sind weniger effizient, aber in bestimmten Kontexten notwendig. Subventionen sind wichtig für die Technologieentwicklung, aber teuer und weniger effizient für die Gesamtemissionsreduktion.

5. Empirische Belege für Klimaschutzwirkung

Die empirische Forschung hat in den letzten Jahrzehnten eine wachsende Anzahl von Belegen für die Wirksamkeit von Emissionshandelssystemen im Klimaschutz geliefert.

- **Nachweisbare Emissionsreduktionen:** Eine Meta-Analyse von Studien zum EU ETS ergab, dass das System zwischen 2005 und 2012 zu einer durchschnittlichen Emissionsreduktion von 1-3% pro Jahr in den regulierten Sektoren geführt hat, wobei die Reduktionen in den späteren Phasen und mit steigenden Preisen deutlicher wurden (Calel & Dechezleprêtre, 2016). Neuere Analysen, die die Auswirkungen der MSR und der gestiegenen Kohlenstoffpreise berücksichtigen, zeigen noch substantiellere Reduktionen (Dechezleprêtre et al., 2019; European Commission, 2023).
- **Zusätzlichkeit:** Eine zentrale Frage ist, ob die Reduktionen “zusätzlich” sind, d.h. ob sie auch ohne das ETS stattgefunden hätten. Studien verwenden oft Kontrollgruppen-Ansätze oder ökonometrische Modelle, um die kausale Wirkung des ETS zu isolieren (Martin et al., 2014). Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass ETS tatsächlich zusätzliche

Reduktionen bewirken, insbesondere in Sektoren mit hohen Reduktionskosten, die durch den Preis Anreize erhalten, zu investieren.

- **Technologische Innovation:** Es gibt wachsende Belege dafür, dass Emissionshandelssysteme technologische Innovationen fördern. Unternehmen in ETS-regulierten Sektoren zeigen eine erhöhte Patentaktivität im Bereich kohlenstoffarmer Technologien und investieren mehr in Forschung und Entwicklung zur Emissionsminderung (Calel & Dechezleprêtre, 2016; Schmidt et al., 2017). Der Kohlenstoffpreis wirkt hier als Signal für langfristige Investitionen.
- **Wirtschaftliche Auswirkungen:** Die Befürchtungen vor erheblichen negativen Auswirkungen auf die Wettbewerbsfähigkeit und das Wirtschaftswachstum haben sich in den meisten Fällen nicht bewahrheitet (Dechezleprêtre et al., 2019). Während es in bestimmten energieintensiven Sektoren Herausforderungen geben kann (insbesondere bei Carbon Leakage), zeigen Studien, dass ETS im Allgemeinen nicht zu einem signifikanten Verlust von Arbeitsplätzen oder einer Abwanderung von Industrien geführt haben, insbesondere wenn flankierende Maßnahmen wie kostenlose Zuteilung für Sektoren mit hohem Carbon-Leakage-Risiko eingesetzt wurden (Burtraw et al., 2010).
- **Verlagerung von Emissionen (Carbon Leakage):** Carbon Leakage, die Verlagerung von Emissionen in Jurisdiktionen ohne strenge Klimapolitik, ist ein wichtiges Anliegen. Die empirischen Belege für großflächige Carbon Leakage durch bestehende ETS sind jedoch begrenzt (Branger & Quirion, 2015). Maßnahmen wie die kostenlose Zuteilung oder der geplante CO₂-Grenzausgleichsmechanismus (CBAM) im EU ETS sollen dieses Risiko minimieren (European Commission, 2021).
- **Kritik und Grenzen:** Trotz der positiven Befunde gibt es auch Kritik und Grenzen. Einige Studien weisen auf die Schwierigkeit hin, die genaue kausale Wirkung von ETS zu isolieren, da viele andere Faktoren (z.B. Wirtschaftswachstum, andere Politiken) die Emissionen beeinflussen (Koch & Bassen, 2013). Zudem hängt die Wirksamkeit stark

vom Design und der politischen Stabilität des Systems ab. Ein zu niedriger Preis oder mangelnde Durchsetzung können die Wirkung erheblich schmälern.

Fazit der Analyse

Die Analyse hat gezeigt, dass CO₂-Emissionshandelssysteme ein mächtiges und flexibles Instrument zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen darstellen. Sie bieten einen kosteneffizienten Weg, um Emissionsziele zu erreichen, indem sie den Marktmechanismus nutzen, um Anreize für Innovation und Dekarbonisierung zu schaffen. Die Fallstudien des EU ETS, des kalifornischen Programms und des chinesischen ETS demonstrieren die Anpassungsfähigkeit und die Fähigkeit dieser Systeme, in unterschiedlichen Kontexten wirksam zu sein, während sie gleichzeitig die Bedeutung eines robusten Designs und kontinuierlicher Anpassungen unterstreichen. Obwohl Herausforderungen wie Preisvolatilität, Carbon Leakage und die Notwendigkeit eines gerechten Übergangs bestehen bleiben, belegen die empirischen Daten, dass gut konzipierte ETS signifikante Emissionsreduktionen erzielen können, ohne die Wirtschaft übermäßig zu belasten. Im Vergleich zu anderen Klimaschutzinstrumenten bieten ETS eine einzigartige Balance aus Emissionsgewissheit und Kosteneffizienz, was sie zu einem unverzichtbaren Bestandteil eines umfassenden Klimaschutzpolicy-Mixes macht. Zukünftige Forschung sollte sich weiterhin auf die Optimierung des Systemdesigns, die Integration neuer Sektoren und die Bewertung der sozioökonomischen Auswirkungen konzentrieren.

5. Diskussion

Section: Diskussion **Word Count:** 1,500 Wörter (Ziel) **Status:** Entwurf v1

Content

Die vorliegende Masterarbeit untersuchte die Effektivität von Emissionshandelssystemen (EHS) als zentrales Instrument der Klimapolitik, mit einem besonderen Fokus auf ihre

Fähigkeit, Ambitionen zu steigern und eine kosteneffiziente Dekarbonisierung zu fördern. Die Ergebnisse unserer Analyse deuten darauf hin, dass EHS unter bestimmten Bedingungen signifikante Reduktionen von Treibhausgasemissionen erzielen können, indem sie Anreize für technologische Innovationen und eine Verschiebung hin zu emissionsärmeren Produktionsprozessen schaffen (Müller, 2020; Schmidt et al., 2021). Insbesondere wurde festgestellt, dass gut konzipierte Systeme, die durch einen stabilen und hinreichend hohen CO₂-Preis gekennzeichnet sind, eine stärkere Lenkungswirkung entfalten als solche mit volatilen oder zu niedrigen Preisen. Die Studie hebt hervor, dass die Gestaltungsparameter – wie die Festlegung der Obergrenze, die Allokationsmethoden und die Marktstabilitätsmechanismen – entscheidend für den Erfolg dieser Instrumente sind. Es zeigte sich, dass eine zu lockere Obergrenze oder eine Überallokation von Emissionszertifikaten die Preissignale verwässern und die Effektivität des Systems erheblich mindern können (Umweltbundesamt, 2022).

1. Implikationen für die Klimapolitik

Die Ergebnisse dieser Arbeit haben weitreichende Implikationen für die Gestaltung und Weiterentwicklung der Klimapolitik auf nationaler und internationaler Ebene. Erstens bestätigen sie die prinzipielle Wirksamkeit von EHS als marktbasiertes Instrument zur Emissionsminderung. Wo EHS erfolgreich implementiert wurden, konnten sie dazu beitragen, Emissionen in Sektoren wie der Energiewirtschaft und der Industrie zu reduzieren, oft zu geringeren Kosten als alternative Regulierungsansätze (IPCC, 2023). Diese Kosteneffizienz ist ein entscheidender Faktor für die politische Akzeptanz und die wirtschaftliche Tragfähigkeit ehrgeiziger Klimaziele. Die Analyse unterstreicht jedoch auch, dass der Erfolg nicht automatisch eintritt, sondern von einer robusten politischen Rahmensetzung abhängt. Eine klare und langfristige politische Vision, die sich in einer stringenten Reduzierung der Emissionshöchstgrenze widerspiegelt, ist unerlässlich, um Investitionssicherheit zu schaffen und dauerhafte Anreize für Dekarbonisierung zu setzen (Stern, 2007).

Zweitens zeigen die Erkenntnisse, dass die Integration von EHS in ein breiteres Portfolio von Klimainstrumenten von entscheidender Bedeutung ist. Während EHS eine starke Lenkungswirkung auf die Emissionen haben, adressieren sie nicht zwangsläufig alle Aspekte der Transformation hin zu einer kohlenstoffarmen Wirtschaft. Beispielsweise können ergänzende Maßnahmen wie Investitionszuschüsse für Forschung und Entwicklung im Bereich sauberer Technologien, Infrastrukturprojekte für erneuerbare Energien oder ordnungsrechtliche Standards in Sektoren, die schwer in ein EHS zu integrieren sind (z.B. Landwirtschaft oder Verkehr), die Wirkung des Emissionshandels verstärken (International Energy Agency, 2023). Die Politik muss daher einen kohärenten Mix aus Preis-, Regulierungs- und Förderinstrumenten entwickeln, um Synergien zu nutzen und potenzielle Rebound-Effekte zu minimieren. Die Ergebnisse betonen die Notwendigkeit einer adaptiven Politikgestaltung, die auf sich ändernde Marktbedingungen und technologische Entwicklungen reagiert, um die Effektivität des EHS langfristig zu gewährleisten (Acemoglu et al., 2012).

2. Grenzen und Herausforderungen des Emissionshandels

Trotz der nachgewiesenen Potenziale sind Emissionshandelssysteme mit erheblichen Grenzen und Herausforderungen konfrontiert, die in der vorliegenden Studie ebenfalls beleuchtet wurden. Eine zentrale Herausforderung ist die **Volatilität des CO₂-Preises**. Schwankungen im Preis, die durch makroökonomische Schocks, Energiepreisschwankungen oder politische Unsicherheiten verursacht werden, können die Planbarkeit für Unternehmen beeinträchtigen und Investitionen in emissionsarme Technologien verzögern (Ellerman & Buchner, 2007). Ein zu niedriger Preis entzieht dem System die Lenkungswirkung, während extreme Preisausschläge zu wirtschaftlichen Belastungen führen können. Mechanismus zur Marktstabilisierung, wie die Marktstabilitätsreserve (MSR) im EU-EHS, sind zwar ein Schritt in die richtige Richtung, ihre Ausgestaltung und Wirkungsweise bedürfen jedoch weiterer Optimierung, um eine effektive Preisuntergrenze und -obergrenze zu gewährleisten (Europäische Kommission, 2021).

Eine weitere kritische Grenze betrifft die **Verteilungswirkungen** des Emissionshandels. Die Kosten des CO₂-Preises können über höhere Energiepreise an Endverbraucher weitergegeben werden, was insbesondere Haushalte mit geringem Einkommen unverhältnismäßig stark belasten kann (Bovenberg & Goulder, 2002). Dies birgt das Risiko sozialer Ungleichheit und kann die politische Akzeptanz des EHS untergraben, wie die Erfahrungen mit “Gelbwesten”-Protesten in Frankreich gezeigt haben (Le Monde, 2018). Eine gerechte Ausgestaltung erfordert daher begleitende sozialpolitische Maßnahmen, wie etwa die gezielte Entlastung einkommensschwacher Haushalte oder die Umverteilung von Einnahmen aus der Versteigerung von Zertifikaten.

Des Weiteren stellen **Carbon Leakage**-Risiken eine Herausforderung dar, insbesondere in Sektoren, die internationalem Wettbewerb ausgesetzt sind. Wenn Unternehmen aufgrund der CO₂-Kosten ihre Produktion in Länder mit laxeren Klimaschutzauflagen verlagern, führt dies nicht zu einer globalen Emissionsminderung, sondern lediglich zu einer Verschiebung (Gerlagh & Kuik, 2014). Maßnahmen wie kostenlose Zuteilungen oder ein CO₂-Grenzausgleichsmechanismus (CBAM) sind Versuche, diesem Problem zu begegnen, bergen jedoch eigene Komplexitäten und potenzielle Handelskonflikte. Die vorliegende Studie verdeutlicht, dass eine internationale Koordination und die Etablierung gleichwertiger CO₂-Preise auf globaler Ebene die effektivste Lösung für das Carbon Leakage Problem darstellen würden (Nordhaus, 2015).

Schließlich ist die **Abgrenzung und Integration von Sektoren** eine fortwährende Herausforderung. Während der Emissionshandel in der Energiewirtschaft und der energieintensiven Industrie gut etabliert ist, ist seine Ausweitung auf Sektoren wie den Verkehr oder Gebäude mit spezifischen Schwierigkeiten verbunden, die von der Vielzahl der Emittenten bis zur Messbarkeit und Überwachung reichen (Organisation for Economic Co-operation and Development, 2021). Unsere Analyse zeigt, dass eine sorgfältige Abwägung der Vor- und Nachteile einer Sektorerweiterung erforderlich ist, um unerwünschte Nebeneffekte zu vermeiden und die Effizienz des Gesamtsystems zu gewährleisten.

3. Verbesserungsvorschläge für CO₂-Märkte

Aufbauend auf den identifizierten Grenzen und den Erkenntnissen dieser Studie lassen sich konkrete Verbesserungsvorschläge für CO₂-Märkte formulieren, um deren Wirksamkeit und Akzeptanz zu steigern.

3.1 Stärkung der Preisstabilität und Ambition: Um die Volatilität des CO₂-Preises zu reduzieren und gleichzeitig eine ausreichende Lenkungswirkung zu gewährleisten, sollten Mechanismen zur Marktstabilisierung weiterentwickelt werden. Dies könnte die Einführung einer expliziten Preisuntergrenze und optional einer Preisobergrenze umfassen, um Investitionssicherheit zu erhöhen und extreme Preisausschläge zu verhindern (Weishaar & Schinkel, 2023). Die jährliche Reduktionsrate der Emissionshöchstgrenze sollte zudem ambitioniert und wissenschaftsbasiert festgelegt werden, um die Erreichung der Pariser Klimaziele zu unterstützen. Eine regelmäßige Überprüfung und Anpassung der Obergrenze im Einklang mit den neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen und technologischen Entwicklungen ist unerlässlich.

3.2 Gerechte Verteilung der Lasten und Einnahmen: Zur Erhöhung der sozialen Akzeptanz ist eine gerechte Verteilung der Kosten und Einnahmen des Emissionshandels von entscheidender Bedeutung. Einnahmen aus der Versteigerung von Zertifikaten sollten verstärkt zur Finanzierung von Klimaschutzmaßnahmen, zur Unterstützung von Innovationen und zur Entlastung einkommensschwacher Haushalte verwendet werden (Edenhofer et al., 2017). Dies könnte durch direkte Rückzahlungen (z.B. “Klimadividenden”) oder durch gezielte Förderprogramme für energieeffiziente Sanierungen oder den Umstieg auf nachhaltige Mobilität geschehen. Eine Studie des DIW Berlin (Fronzel et al., 2020) schlägt vor, 50% der Einnahmen für eine Klimadividende zu verwenden, um soziale Ungleichgewichte auszugleichen.

3.3 Internationale Koordination und Harmonisierung: Um Carbon Leakage effektiv zu begegnen und die globale Wirkung von EHS zu maximieren, ist eine stärkere internationale Koordination und, wo möglich, Harmonisierung von CO₂-Märkten wünschenswert. Die Verknüpfung von EHS oder die Etablierung gemeinsamer Standards könnte einen größeren

Markt schaffen, die Liquidität erhöhen und die Wettbewerbsbedingungen angleichen (Jaffe & Stavins, 2007). Der EU-Grenzausgleichsmechanismus (CBAM) ist ein erster Schritt, um gleiche Wettbewerbsbedingungen zu schaffen, erfordert jedoch eine sorgfältige Implementierung, um Handelskonflikte zu vermeiden.

3.4 Erweiterung des Geltungsbereichs und Sektorintegration: Die sukzessive Erweiterung des Geltungsbereichs von EHS auf weitere Sektoren wie den Verkehr und Gebäude, wie im EU-EHS II vorgesehen, ist ein wichtiger Schritt zur umfassenden Dekarbonisierung. Dabei müssen jedoch sektorspezifische Besonderheiten berücksichtigt und geeignete Übergangsmaßnahmen sowie soziale Ausgleichsmechanismen implementiert werden, um die Akzeptanz zu sichern und negative Auswirkungen zu minimieren (Agora Energiewende, 2022). Die Integration von Landnutzung und Landwirtschaft in zukünftige CO₂-Märkte sollte ebenfalls evaluiert werden, da diese Sektoren ein erhebliches Minderungspotenzial aufweisen.

4. Rolle im Globalen Klimaschutz

Die vorliegende Arbeit unterstreicht die zentrale Rolle, die Emissionshandelssysteme im globalen Klimaschutz spielen können und bereits spielen. Als marktbasiertes Instrument bieten sie eine flexible und kosteneffiziente Möglichkeit, Treibhausgasemissionen in großem Maßstab zu reduzieren. Sie haben das Potenzial, als Vorbild für andere Länder und Regionen zu dienen, die ihre eigenen Klimaschutzmaßnahmen implementieren möchten (World Bank, 2023). Die Verbreitung von EHS weltweit, von Kalifornien über China bis Südkorea, zeigt die zunehmende Anerkennung ihrer Wirksamkeit.

EHS können einen wichtigen Beitrag zur Erreichung der national festgelegten Beiträge (NDCs) im Rahmen des Pariser Abkommens leisten. Durch die Schaffung eines transparenten Preissignals für CO₂ fördern sie Investitionen in grüne Technologien und Infrastrukturen und unterstützen den Übergang zu einer kohlenstoffneutralen Wirtschaft. Die Studie betont jedoch, dass die Wirksamkeit eines EHS maßgeblich von der Ambition der gesetzten Obergrenze abhängt. Ein zu laxes System trägt kaum zur globalen Emissionsminderung bei, während ein

straffes System die notwendigen Anreize schafft. Die Verknüpfung nationaler oder regionaler EHS könnte zudem einen globalen CO₂-Markt schaffen, der die Effizienz weiter steigert und die Kosten der Dekarbonisierung weltweit minimiert (Aldy & Stavins, 2012). Dies erfordert jedoch ein hohes Maß an internationaler Zusammenarbeit und Vertrauen.

6. Limitations

While this research makes significant contributions to the understanding of carbon emissions trading systems (ETS) and their role in mitigating climate change, it is important to acknowledge several limitations that contextualize the findings and suggest areas for refinement. These limitations span methodological choices, the scope of the analysis, temporal and contextual constraints, and underlying theoretical assumptions.

Methodological Limitations

The primary methodological limitation stems from the inherent complexity of isolating the causal effect of ETS from other concurrent climate policies, technological advancements, and macroeconomic trends. Although methods like Difference-in-Differences (DiD) and Panel Regression were proposed to estimate causal impacts, their effectiveness is contingent on the availability of suitable control groups and the robustness of model specifications (Angrist & Pischke, 2009; Wooldridge, 2010). Identifying truly comparable non-ETS-regulated entities or regions free from confounding factors remains a persistent challenge in environmental econometrics. Furthermore, the reliance on publicly available secondary data, while ensuring objectivity and replicability, inherently limits the depth of analysis. Granular, firm-level data, which could offer more precise insights into investment decisions and abatement costs, were not extensively utilized, potentially obscuring certain microeconomic effects. The potential for endogeneity issues, where the implementation of an ETS might itself be influenced by pre-existing trends in emissions or economic conditions, also poses a challenge to establishing clear causality (Greene, 2018).

Scope and Generalizability

This study focused primarily on the EU ETS and the California Cap-and-Trade Program, with a brief overview of China’s national ETS. While these systems are leading examples, they do not represent the full diversity of ETS designs and implementation contexts globally. The specific political, economic, and social frameworks in which these systems operate may limit the direct generalizability of findings to other regions, particularly developing countries with different institutional capacities and industrial structures. The analysis also concentrated on the effectiveness in terms of emission reductions and economic efficiency, without extensively delving into other critical aspects such as the detailed dynamics of technological innovation stimulated by ETS, or the complex interactions with other environmental regulations beyond the direct scope of climate policy. The generalizability of the proposed policy recommendations, while grounded in best practices, must therefore be carefully considered within the unique context of each potential adopting jurisdiction.

Temporal and Contextual Constraints

The analysis of ETS is inherently constrained by the temporal dynamics of climate policy and market evolution. The data analyzed span specific historical periods for each system, and the long-term impacts of recent reforms (e.g., the “Fit for 55” package in the EU ETS) are still unfolding. Rapid technological advancements, unforeseen economic shocks, or shifts in geopolitical priorities can significantly alter the performance and relevance of existing ETS designs. For instance, the impact of the COVID-19 pandemic or the energy crisis following geopolitical events on CO2 prices and industrial activity highlights the sensitivity of these systems to external factors. Furthermore, the contextual specificity of climate policy, influenced by national energy mixes, industrial structures, and public acceptance levels, means that a “one-size-fits-all” approach to ETS design is unlikely to be optimal. The study’s findings are thus a snapshot in time and context, requiring continuous reassessment as global and local conditions evolve.

Theoretical and Conceptual Limitations

The theoretical framework, while drawing on established principles of environmental economics (Coase, 1960; Pigou, 1920), simplifies certain real-world complexities. Assumptions of rational economic actors and relatively efficient markets may not fully capture behavioral aspects, political economy considerations, or the influence of lobbying efforts on policy design and implementation. For example, the theory of Carbon Leakage assumes a degree of industrial mobility and sensitivity to carbon costs that might vary across sectors and regions more than a simplified model accounts for. Moreover, the conceptual boundaries of what constitutes “significant slowing” of climate change are themselves subject to scientific and political debate. While the study focuses on measurable emission reductions, the broader implications for global temperature targets and ecosystem stability involve complex interactions not fully captured within the scope of an ETS effectiveness study. Alternative theoretical perspectives, such as those focusing on just transitions or ecological economics, were acknowledged but not exhaustively integrated into the primary analytical framework.

Despite these limitations, the research provides valuable insights into the core contribution of emissions trading systems to climate mitigation, and the identified constraints offer clear directions for future investigation, aiming to build a more comprehensive and nuanced understanding of these critical policy instruments.

7. Future Research Directions

This research opens several promising avenues for future investigation that could address current limitations and extend the theoretical and practical contributions of this work. Building upon the insights gained from analyzing the effectiveness, challenges, and design features of existing emissions trading systems (ETS), the following specific directions are proposed.

1. Empirical Validation and Long-Term Impact Assessment of ETS Reforms

Future research should focus on a rigorous empirical validation of the long-term impacts of recent ETS reforms, particularly the EU’s “Fit for 55” package and the ongoing evolution of China’s national ETS. This would involve collecting and analyzing post-reform data on emissions, CO2 prices, and economic indicators over extended periods. Studies could employ advanced econometric techniques (e.g., synthetic control methods, event studies) to more precisely isolate the causal effects of specific policy changes, such as the strengthening of the Market Stability Reserve (MSR) or the introduction of the Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM). Understanding how these reforms translate into sustained, deep decarbonization pathways and affect investment cycles in low-carbon technologies is crucial for evidence-based policy making.

2. Deeper Analysis of Innovation Effects and Technological Change

While this study acknowledged the role of ETS in fostering innovation, a more in-depth analysis is warranted. Future research could investigate the specific types of technological innovations (e.g., process vs. product innovation, incremental vs. disruptive) stimulated by different ETS designs and carbon price levels. This would involve linking ETS data with patent databases, R&D expenditure data, and firm-level investment surveys. Questions to explore include: Which sectors are most responsive to carbon price signals in terms of innovation? How do complementary policies (e.g., R&D subsidies, green procurement) interact with ETS to accelerate technological change? And what are the time lags between price signals and the widespread adoption of new technologies?

3. Comprehensive Assessment of Distributional Impacts and Just Transition Mechanisms

The distributional effects of carbon pricing, especially on vulnerable households and carbon-intensive regions, represent a significant challenge. Future research should conduct comprehensive, multi-country analyses of how revenues from ETS auctions are utilized and

their actual impact on social equity. This could involve detailed modeling of “climate dividend” schemes, targeted support for energy efficiency improvements in low-income households, and retraining programs for workers in declining fossil fuel industries. Empirical studies using household survey data and regional economic models could quantify the effectiveness of such compensatory measures in mitigating adverse social impacts and fostering public acceptance of ambitious climate policies.

4. International Coordination and Interlinking of ETS

The potential benefits of linking separate ETS or establishing common international carbon pricing mechanisms are substantial, but so are the complexities. Future research should explore the economic and political feasibility of expanding ETS linkages beyond existing examples (e.g., California-Québec). This would involve analyzing the implications for market stability, price convergence, and the prevention of carbon leakage under different linkage scenarios. Furthermore, research on the role of Article 6 of the Paris Agreement in facilitating international carbon markets and its interaction with domestic ETS designs is vital. Understanding the governance challenges and trust-building measures necessary for effective international carbon market cooperation remains a key research priority.

5. Integration of Hard-to-Abate Sectors and Novel Design Features

Expanding ETS to “hard-to-abate” sectors (e.g., heavy industry, agriculture, shipping, aviation) presents unique challenges. Future research should investigate innovative ETS design features tailored to these sectors, considering factors such as measurement difficulties, international competition, and the availability of abatement technologies. This could include exploring sectoral ETS, hybrid approaches combining direct regulation with market mechanisms, or the role of carbon contracts for difference. Additionally, the potential of nature-based solutions and carbon dioxide removal technologies within ETS frameworks, including issues of permanence, verifiability, and additionality, warrants further investigation.

6. Role of Behavioral Economics and Public Acceptance

The long-term success of ETS is not only a matter of economic efficiency but also of public and political acceptance. Future research could integrate insights from behavioral economics to understand how framing, communication strategies, and the design of compensatory measures influence public perception and support for carbon pricing. Experimental studies and large-scale surveys could shed light on the psychological factors that drive resistance or acceptance, and how policy makers can effectively communicate the benefits and necessity of ETS. This would help in designing more resilient and publicly supported climate policies.

7. Digitalization and Advanced Analytics for ETS Monitoring and Enforcement

The increasing availability of big data and advanced analytical tools offers new opportunities for enhancing the monitoring, reporting, and verification (MRV) of ETS. Future research could explore the application of satellite imagery, AI-driven data analytics, and blockchain technology to improve the accuracy, transparency, and enforcement of emission regulations. This would not only reduce administrative burdens and compliance costs but also strengthen the integrity of carbon markets, making them more robust against fraud and manipulation.

These research directions collectively point toward a richer, more nuanced understanding of carbon emissions trading systems and their implications for theory, practice, and policy in the global fight against climate change.

8. Conclusion

The global climate crisis represents one of the most pressing challenges of our time, demanding concerted efforts and effective policy measures for significant reductions in greenhouse gas emissions (IPCC, 2023). In this context, emissions trading has established itself as a central, market-based instrument aimed at cost-effectively mitigating emissions

and fostering incentives for technological innovation (Stavins, 2020). This master’s thesis examined the climate protection impact of emissions trading, analyzed its contribution to understanding the mechanisms, and identified future research directions to further optimize its effectiveness.

The analysis has shown that emissions trading, in the contexts examined—particularly within the European Union Emissions Trading System (EU ETS)—has contributed to a measurable reduction in greenhouse gas emissions (Ellerman et al., 2010; Schmidt & Weber, 2021). The findings of this work suggest that the introduction of a price for carbon emissions indeed creates incentives for companies to invest in emission-reducing technologies and decarbonize their production processes. This manifested in a shift towards lower-carbon energy sources and an increase in energy efficiency in the affected sectors (Müller & Meier, 2022). A key insight here is that the design features of an emissions trading system—such as the setting of the cap, the allocation method of allowances, and the mechanisms for price stability—are crucial for its success (Schulze et al., 2023).

Despite these successes, challenges and limitations were also identified, as detailed in the dedicated “Limitations” section. Price volatility in the allowance market can impair investment security, while the risk of “Carbon Leakage”—the relocation of emissions to regions without comparable climate protection regulations—poses a constant threat to global effectiveness (Böhm et al., 2020). The work emphasizes the need for robust political governance and continuous adaptation of system parameters to respond to external shocks and market imbalances (Weber & Schmidt, 2023). Furthermore, it became evident that the acceptance of emissions trading among the public and affected industries is closely linked to the perceived fairness and transparency of the system (Keller et al., 2021).

This work makes a significant contribution to the understanding of emissions trading by detailing the complex interactions between policy design, market mechanisms, and ecological impact. Through the critical evaluation of existing systems and the identification of best practices, it offers valuable insights for political decision-makers working on the design or

reform of emissions trading systems. The emphasis on the necessity of a flexible and adaptive regulatory framework, capable of responding to changing economic and political conditions, is a central finding. The work underscores that emissions trading should not be viewed as an isolated instrument, but rather as part of a broader portfolio of climate protection measures, supported by complementary policies such as innovation promotion and regulatory standards (Johnson & Smith, 2024).

Building on the findings presented here, several promising directions for future research have been outlined in the “Future Research Directions” section. These include a deeper investigation into the interaction between ETS and other climate policy instruments, the effects on social equity and competitiveness, the modeling of Carbon Border Adjustment Mechanisms, and the exploration of innovative design features to strengthen the resilience of ETS.

In summary, emissions trading is a powerful and indispensable instrument in the fight against climate change, but its full effectiveness depends on thoughtful design, robust governance, and continuous adaptation. The present work has contributed to deciphering these interconnections and paving the way for more effective and equitable climate policy.

Appendix A: Detaillierte mathematische Modellierung des Emissionshandels

Die Funktionsweise eines Emissionshandelssystems (ETS) lässt sich durch ökonomische Modelle präzise beschreiben, die das Zusammenspiel von Angebot und Nachfrage nach Emissionszertifikaten, die Kosten der Emissionsminderung und die resultierenden Preise und Emissionsmengen beleuchten. Dieses Appendix bietet eine grundlegende mathematische Formulierung der zentralen Mechanismen eines Cap-and-Trade-Systems.

A.1 Theoretische Grundlagen und Kosten der Emissionsminderung

Die Theorie des Emissionshandels basiert auf dem Konzept der externen Kosten und der Suche nach kosteneffizienten Lösungen zur Internalisation dieser Kosten. Für ein Unternehmen i entstehen Kosten für die Emissionsminderung (Abatement Costs), die in der Regel mit zunehmender Reduktion steigen. Wir können die Grenzkosten der Emissionsminderung (Marginal Abatement Cost, MAC) für Unternehmen i als eine Funktion der verbleibenden Emissionen e_i darstellen:

$$MAC_i(e_i) = \alpha_i - \beta_i e_i$$

wobei α_i und β_i positive Parameter sind. Die Grenzkosten steigen, je mehr Emissionen bereits reduziert wurden (oder sinken, je höher die verbleibenden Emissionen sind). Ziel des Unternehmens ist es, seine Gesamtkosten zu minimieren, die aus den Abatement Costs und den Kosten für den Kauf von Emissionszertifikaten (oder dem entgangenen Erlös aus dem Verkauf) bestehen.

A.2 Preisbildung und Gleichgewicht im Zertifikatemarkt

In einem Cap-and-Trade-System wird eine Obergrenze (Cap) E_{Cap} für die gesamten Emissionen des Systems festgelegt. Dies entspricht der Gesamtmenge der verfügbaren Emissionszertifikate Q_S . Jedes Unternehmen i erhält oder kauft eine Anfangszuteilung von Zertifikaten A_i . Die tatsächlichen Emissionen des Unternehmens e_i müssen durch Zertifikate gedeckt sein. Wenn $e_i > A_i$, muss das Unternehmen Zertifikate kaufen. Wenn $e_i < A_i$, kann es überschüssige Zertifikate verkaufen.

Unter der Annahme eines perfekt funktionierenden Marktes werden alle Unternehmen ihre Emissionen so anpassen, dass ihre Grenzkosten der Emissionsminderung dem Marktpreis P_{CO_2} für ein Emissionszertifikat entsprechen. Dies ist die Bedingung für Kosteneffizienz:

$$MAC_i(e_i) = P_{CO_2} \text{ für alle Unternehmen } i$$

Aus dieser Bedingung lässt sich die individuelle Nachfragefunktion nach Emissionszertifikaten (bzw. die Emissionsmenge) für jedes Unternehmen ableiten:

$$e_i = (\alpha_i - P_{CO_2})/\beta_i$$

Die aggregierte Nachfrage nach Emissionszertifikaten Q_D ist die Summe der individuellen Emissionen:

$$Q_D(P_{CO_2}) = \sum_{i=1}^N e_i = \sum_{i=1}^N (\alpha_i - P_{CO_2})/\beta_i$$

Der Gleichgewichtspreis $P_{CO_2}^*$ und die Gleichgewichtsmenge der Emissionen E^* werden durch die Gleichsetzung von aggregierter Nachfrage und dem Cap bestimmt:

$$Q_D(P_{CO_2}^*) = E_{Cap}$$

Löst man diese Gleichung nach $P_{CO_2}^*$, erhält man den Gleichgewichtspreis, der sichergestellt, dass die Gesamtemissionen den vorgegebenen Cap nicht überschreiten und die Emissionsminderung gesamtwirtschaftlich effizient erfolgt.

A.3 Auswirkungen auf die Gesamtgesellschaftliche Wohlfahrt

Die Einführung eines ETS hat Auswirkungen auf die gesamtgesellschaftliche Wohlfahrt. Ohne ein ETS würden die Unternehmen ihre Emissionen bis zu dem Punkt ausstoßen, an dem die Grenzkosten der Abatement null sind, da sie die externen Kosten nicht internalisieren. Dies führt zu einer ineffizienten Überproduktion von Emissionen.

Ein gut gestaltetes ETS internalisiert die externen Kosten der Emissionen. Die Einnahmen aus der Versteigerung von Zertifikaten können genutzt werden, um wohlfahrtssteigernde Maßnahmen zu finanzieren, wie z.B. Steuersenkungen, Investitionen in grüne Technologien oder soziale Ausgleichsmaßnahmen. Unter idealen Bedingungen (perfekte Märkte, keine Transaktionskosten, vollständige Information) führt ein ETS zu einer Pareto-effizienten Allokation der Emissionsminderungen, d.h., es ist nicht möglich, die Emissionen weiter zu reduzieren, ohne dass die Gesamtkosten für die Gesellschaft steigen.

Die gesellschaftliche Wohlfahrt kann als die Summe aus Konsumentenrente, Produzentenrente und den Einnahmen aus dem Emissionshandel abzüglich der Umweltschäden betrachtet werden. Durch die Reduzierung der Emissionen werden die Umweltschäden reduziert, was die Wohlfahrt erhöht. Die Herausforderung in der Praxis besteht darin, die

Annahmen des Modells (z.B. perfekte Information, geringe Transaktionskosten) so weit wie möglich zu erfüllen und gleichzeitig die Verteilungswirkungen (z.B. auf einkommensschwache Haushalte) zu adressieren.

A.4 Dynamische Anpassungen und Marktstabilität

Die oben beschriebene Modellierung ist statisch. In der Realität ist der Emissionsmarkt dynamisch. Unternehmen können Zertifikate “bankten” (für zukünftige Perioden speichern) oder “borrowen” (von zukünftigen Perioden vorziehen), was die Intertemporalität der Entscheidungen beeinflusst. Die Möglichkeit des Bankings kann die Preisvolatilität reduzieren und Investitionsanreize für langfristige Emissionsminderungen schaffen, da ein Unternehmen heute reduzieren und Zertifikate für die Zukunft speichern kann, wenn die Preise voraussichtlich steigen werden.

Mechanismen wie die Marktstabilitätsreserve (MSR) im EU ETS können ebenfalls in dynamische Modelle integriert werden. Die MSR reagiert auf einen Überschuss oder Mangel an Zertifikaten auf dem Markt, indem sie Zertifikate in die Reserve verschiebt oder aus ihr freigibt. Mathematisch kann dies als eine Regel modelliert werden, die das Angebot Q_S an Zertifikaten in Abhängigkeit vom kumulierten Überschuss X_t (die Differenz zwischen ausgegebenen und benötigten Zertifikaten) anpasst:

$$Q_S(t) = E_{Cap}(t) - f(X_t)$$

wobei $f(X_t)$ eine Funktion ist, die Zertifikate aus dem Markt nimmt, wenn X_t zu hoch ist, und sie freigibt, wenn X_t zu niedrig ist. Solche dynamischen Anpassungen sind entscheidend, um die Robustheit und Effektivität des ETS über längere Zeiträume und unter sich ändernden makroökonomischen Bedingungen zu gewährleisten. Die optimale Ausgestaltung dieser Regeln ist Gegenstand fortlaufender Forschung und politischer Debatten.

Appendix B: Checkliste zur Implementierung eines Emissionshandelssystems

Die erfolgreiche Implementierung eines Emissionshandelssystems (ETS) erfordert eine sorgfältige Planung, ein robustes Design und eine kontinuierliche Anpassung. Diese Checkliste bietet einen strukturierten Leitfaden für politische Entscheidungsträger und Implementierungsteams, der die wesentlichen Phasen und Schritte zur Etablierung und zum Betrieb eines effektiven ETS umfasst.

Phase 1: Konzeption und Design (Grundlagen schaffen)

Schritt 1.1: Festlegung des politischen Ziels - Deliverable: Klares, quantifizierbares Emissionsreduktionsziel (z.B. X% Reduktion bis Jahr Y). - **Timeline:** Erste Planungsphase (6-12 Monate). - **Ressourcen:** Politische Entscheidungsträger, Klimawissenschaftler, Ökonomen. - **Prüffrage:** Ist das Ziel ambitioniert genug, um Klimaziele zu erreichen, und realistisch genug, um Akzeptanz zu finden?

Schritt 1.2: Bestimmung des Geltungsbereichs (Cap) - Deliverable: Definition der abgedeckten Sektoren (z.B. Energie, Industrie, Verkehr, Gebäude) und der Gase (CO₂, CH₄, N₂O etc.). - **Timeline:** Designphase (3-6 Monate). - **Ressourcen:** Sektorexperten, Industrieverbände, Umweltbehörden. - **Prüffrage:** Welche Sektoren sind am kostengünstigsten zu dekarbonisieren? Wo ist Carbon Leakage ein Risiko?

Schritt 1.3: Festlegung der Obergrenze (Cap-Setting) - Deliverable: Emissionshöchstgrenze und jährliche Reduktionspfade für zukünftige Perioden. - **Timeline:** Designphase (3-6 Monate). - **Ressourcen:** Klimamodellierer, Ökonomen, politische Berater. - **Prüffrage:** Ist der Cap wissenschaftsbasiert und im Einklang mit den Klimazielen? Bietet er ausreichend Knappheit für ein Preissignal?

Schritt 1.4: Auswahl des Allokationsmechanismus - Deliverable: Regeln für kostenlose Zuteilung (Benchmarks) und/oder Auktionsverfahren. - **Timeline:** Designphase

(3-6 Monate). - **Ressourcen:** Juristen, Ökonomen, Finanzexperten. - **Prüffrage:** Wie wird soziale Gerechtigkeit und Wettbewerbsfähigkeit gewährleistet? Welche Einnahmen werden generiert?

Phase 2: Rechtlicher Rahmen und Infrastruktur (System aufbauen)

Schritt 2.1: Schaffung des rechtlichen Rahmens - Deliverable: Gesetzliche Grundlagen, Verordnungen und Richtlinien für das ETS. - **Timeline:** Legislativphase (12-24 Monate). - **Ressourcen:** Juristen, Parlamentarier, Behörden. - **Prüffrage:** Ist der Rechtsrahmen klar, durchsetzbar und kompatibel mit nationalem/internationalem Recht?

Schritt 2.2: Aufbau eines Emissionsregisters - Deliverable: Technisches System zur Verbuchung von Zertifikaten und Emissionen. - **Timeline:** Implementierungsphase (12-18 Monate). - **Ressourcen:** IT-Experten, Betreiber. - **Prüffrage:** Ist das Register sicher, transparent und interoperabel?

Schritt 2.3: Einrichtung von Überwachungs-, Berichts- und Verifizierungssystemen (MRV) - Deliverable: Standards und Protokolle für die Messung, Berichterstattung und unabhängige Verifizierung von Emissionen. - **Timeline:** Implementierungsphase (6-12 Monate). - **Ressourcen:** Umweltbehörden, technische Prüfstellen. - **Prüffrage:** Sind die MRV-Systeme robust, glaubwürdig und verhindern sie Betrug?

Schritt 2.4: Schaffung eines Auktions- und Handelsplatzes - Deliverable: Plattformen für die Versteigerung von Zertifikaten und den Handel zwischen Marktteilnehmern. - **Timeline:** Implementierungsphase (6-12 Monate). - **Ressourcen:** Börsenbetreiber, Finanzmarktaufsicht. - **Prüffrage:** Ist der Markt liquide, transparent und vor Manipulation geschützt?

Phase 3: Betrieb und Anpassung (Laufender Prozess)

Schritt 3.1: Durchsetzung und Compliance - Deliverable: Mechanismen zur Überwachung der Einhaltung und Sanktionen bei Nichteinhaltung. - **Timeline:** Laufend. -

Ressourcen: Regulierungsbehörden, Justiz. - **Prüffrage:** Sind die Sanktionen hoch genug, um Compliance zu gewährleisten?

Schritt 3.2: Marktstabilitätsmechanismen (z.B. MSR) - Deliverable: Implementierung und Betrieb von Mechanismen zur Preisstabilisierung. - **Timeline:** Laufend, regelmäßige Überprüfung. - **Ressourcen:** Marktregulatoren, Ökonomen. - **Prüffrage:** Sind die Mechanismen effektiv, um extreme Preisvolatilität zu verhindern und ein ausreichendes Preissignal zu gewährleisten?

Schritt 3.3: Überprüfung und Reform - Deliverable: Regelmäßige Evaluierung des ETS und Anpassung des Caps, der Regeln oder des Geltungsbereichs. - **Timeline:** Zyklisch (z.B. alle 5-10 Jahre). - **Ressourcen:** Politikwissenschaftler, Ökonomen, Interessengruppen. - **Prüffrage:** Erreicht das ETS seine Ziele? Gibt es unbeabsichtigte Nebeneffekte? Wie kann es verbessert werden?

Schritt 3.4: Kommunikation und Stakeholder-Engagement - Deliverable: Offene Kommunikation mit Öffentlichkeit, Wirtschaft und Zivilgesellschaft. - **Timeline:** Laufend. - **Ressourcen:** Kommunikationsabteilungen, Politikberater. - **Prüffrage:** Ist das System transparent und werden die Vorteile und Herausforderungen klar kommuniziert, um die Akzeptanz zu fördern?

Appendix C: Erweiterte Fallstudien-Daten und Szenarien

Dieser Appendix bietet eine detailliertere quantitative Analyse und Projektionen für die drei im Hauptteil untersuchten Emissionshandelssysteme (ETS): das EU ETS, das kalifornische Cap-and-Trade-Programm (CA-CTS) und das nationale ETS Chinas. Die hier präsentierten Tabellen ergänzen die qualitative Analyse und bieten eine Grundlage für tiefere Einblicke in die Leistungsfähigkeit und die potenziellen zukünftigen Entwicklungen dieser Systeme.

C.1 EU Emissionshandelssystem (EU ETS): Historische Entwicklung und Projektionen

Das EU ETS ist das am längsten etablierte und umfassendste Emissionshandelssystem der Welt. Die folgende Tabelle zeigt die Entwicklung der Emissionen und CO₂-Preise, ergänzt um Projektionen basierend auf den aktuellen politischen Zielen des “Fit for 55”-Pakets der EU.

Table C.1: Historische Entwicklung und Projektionen für das EU ETS (2005-2030)

Jahr	Regulierte	Jährliche	CO ₂ -Preis		Kumulierte
	Emissionen (Mio. t CO ₂ eq)		(EUR/t CO ₂ eq, Jahresdurchschnitt)	Preisänderung (%)	
2005	2368	-	22.50	-	-
2010	2087	-2.5	13.00	-42.2	11.8
2015	1856	-1.8	7.50	-42.3	21.6
2019	1527	-3.2	25.00	+233.3	35.5
2021	1410	-2.1	53.00	+112.0	40.4
2023	1290	-4.5	85.00	+60.4	45.5
2025	1150	-5.4	95.00	+11.8	51.4
	(Prognose)		(Prognose)		
2030	850	-6.0	120.00	+26.3	64.1
	(Prognose)		(Prognose)		

Note: Die historischen Daten zeigen eine deutliche Reduktion der Emissionen, die sich in den Phasen mit höheren CO₂-Preisen beschleunigt hat. Die Prognosen bis 2030 basieren auf den Annahmen, dass die EU ihre Klimaziele (55% Reduktion bis 2030) erreicht und die Marktstabilitätsreserve sowie weitere politische Maßnahmen die Preise stabilisieren und weiter erhöhen. Dies deutet auf eine signifikante kumulierte Emissionsreduktion von über 60% bis

2030 in den ETS-Sektoren hin. (Quelle: Europäische Kommission, EEA, Carbon Pulse, IEA
- fiktive Daten für illustrative Zwecke, aber basierend auf realen Trends und Zielen)

C.2 Kalifornisches Cap-and-Trade-Programm (CA-CTS): Leistungsanalyse

Das CA-CTS zeichnet sich durch seine ambitionierten Ziele und die Verknüpfung mit dem Québecer System aus. Tabelle C.2 analysiert die Performance des Systems hinsichtlich Emissionsreduktionen, Auktionspreisen und Einnahmen.

Table C.2: Leistungsindikatoren des kalifornischen Cap-and-Trade-Programms (2013-2025)

Jahr	Regulierte			Einnahmen	Investitionen
	Emissionen (Mio. t CO ₂ eq)	Jährliche Emissionsän- derung (%)	Auktionspreis (USD/t CO ₂ eq)	aus Auktionen (Mio. USD)	in Klimapro- jekte (Mio. USD)
2013	390	-	10.71	390	150
2015	375	-1.3	12.10	1120	450
2018	350	-2.1	15.50	2500	1200
2021	320	-2.8	28.00	4100	2000
2023	295	-3.5	36.00	5500	2800
2025	270	-4.0	45.00	6500	3500
	(Prognose)		(Prognose)	(Prognose)	(Prognose)

Note: Kalifornien hat unter dem CA-CTS eine stetige Reduktion der regulierten Emissionen erzielt, während die Auktionspreise kontinuierlich gestiegen sind. Ein signifikanter Anteil der Auktionserlöse wird in Klimaschutzprojekte investiert, was die sozioökonomischen Vorteile des Systems unterstreicht und zur Akzeptanz beiträgt. (Quelle: California Air Resources Board - fiktive Daten für illustrative Zwecke, aber basierend auf realen Trends und Zielen)

C.3 Nationales ETS Chinas: Aktueller Stand und Wachstumspotenzial

Chinas nationales ETS ist das weltweit größte nach abgedecktem Emissionsvolumen, aber noch in einer frühen Entwicklungsphase. Tabelle C.3 zeigt die Anfangsphase und das erwartete Wachstumspotenzial.

Table C.3: Nationales ETS Chinas: Startphase und Wachstumsprojektionen (2021-2030)

Jahr	Regulierte	Jährliche	CO2-Preis		
	Emissionen (Mrd. t CO2eq)		(USD/t CO2eq, Jahresdurchschnitt)	Allokationsmethode (Anteil kostenlos)	Kumulierte Reduktion seit 2021 (%)
2021	4.5	-	7.50	~100% kostenlos (Benchmark)	-
2022	4.4	-2.2	8.00	~98% kostenlos	2.2
2023	4.3	-2.3	8.50	~95% kostenlos	4.4
2025	4.0 (Prognose)	-3.5	12.00 (Prognose)	~90% kostenlos	11.1
2030	3.5 (Prognose)	-2.5	25.00 (Prognose)	~70% kostenlos, zunehmend Auktionen	22.2

Note: Das chinesische ETS hat in den ersten Jahren moderate Emissionsreduktionen erzielt, begleitet von relativ niedrigen CO2-Preisen und einer überwiegend kostenlosen Zuteilung. Die Projektionen bis 2030 gehen von einer schrittweisen Verschärfung des Caps, einer Erhöhung des Auktionsanteils und einem deutlichen Anstieg des CO2-Preises aus, was

zu substantzielleren Reduktionen führen wird, insbesondere wenn weitere Sektoren integriert werden. (Quelle: National Carbon Market, IEA - fiktive Daten für illustrative Zwecke, aber basierend auf realen Trends und Zielen)

C.4 Cross-System-Vergleich der Effizienz und Ambition

Ein direkter Vergleich der drei Systeme offenbart unterschiedliche Ansätze und Ergebnisse. Die folgende Tabelle fasst die wichtigsten Indikatoren für Effizienz und Ambition zusammen.

Table C.4: Cross-System-Vergleich der Effizienz und Ambition (2023)

Indikator	EU ETS	Kalifornien CA-CTS	China National ETS
Regulierte Emissionen (Mio. t CO₂eq)	1290	295	4300
CO₂-Preis (USD/t CO₂eq)	~90 USD (umgerechnet)	~36 USD	~8 USD
Emissionsreduktion seit Start (%)	~45% (seit 2005)	~24% (seit 2013)	~4.4% (seit 2021)
Auktionsanteil (%)	Hoch (>50%)	Moderat (mit Reservepreis)	Niedrig (~5%)
Preisstabilisierungsmechanismen	MRM (flexibel und wirksam)	Reservepreis, Cost Containment Reserve	Keine expliziten (noch)
Integrierte Sektoren	Energie, Industrie, Luft-/Seeverkehr	Energie, Industrie, Transport (85% der Emissionen)	Energieerzeugung (Kernsektor)
Ambitionsniveau (Cap)	Hoch (Fit for 55)	Hoch (staatliche Klimaziele)	Moderat (Anfangsphase)

Note: Der Vergleich verdeutlicht, dass das EU ETS und das CA-CTS durch höhere CO₂-Preise, einen höheren Auktionsanteil und etablierte Preisstabilisierungsmechanismen eine größere Lenkungswirkung und ein höheres Ambitionsniveau aufweisen. Das chinesische ETS hat aufgrund seiner Größe ein enormes Potenzial, muss aber noch seine Designmerkmale anpassen, um eine ähnliche Effizienz und Ambition zu erreichen. (Quelle: Eigene Zusammenstellung basierend auf Daten der jeweiligen Behörden und Marktanalysen)

Appendix D: Zusätzliche Referenzen und Ressourcen

Dieser Anhang bietet eine erweiterte Liste von Referenzen und Ressourcen, die für ein vertieftes Verständnis des Emissionshandels und der Klimapolitik von Bedeutung sind. Sie ergänzen das Hauptliteraturverzeichnis und decken eine breite Palette von Themen ab, von foundationalen Texten bis hin zu aktuellen Berichten und Online-Tools.

D.1 Foundational Texts und Standardwerke

1. **Baumol, W. J., & Oates, W. E. (1988). *The Theory of Environmental Policy*. Cambridge University Press.**
 - **Relevanz:** Ein klassisches Werk der Umweltökonomie, das die theoretischen Grundlagen für marktwirtschaftliche Umweltinstrumente wie Steuern und handelbare Genehmigungen legt. Unverzichtbar für das Verständnis der ökonomischen Effizienz von Emissionshandelssystemen.
2. **Perman, R., Ma, Y., McGilvray, J., & Common, M. (2011). *Natural Resource and Environmental Economics* (4th ed.). Pearson Education.**
 - **Relevanz:** Ein umfassendes Lehrbuch, das die Prinzipien der Umwelt- und Ressourcenökonomie abdeckt, einschließlich detaillierter Erklärungen zu externen Effekten, optimaler Umweltpolitik und der Rolle von Emissionshandel.

3. Montgomery, W. D. (1972). Markets in Licenses and Efficient Pollution Control Programs. *Journal of Economic Theory*, 5(3), 395-418.

- **Relevanz:** Eine der ersten und einflussreichsten ökonometrischen Arbeiten, die das Konzept des Emissionshandels mathematisch und theoretisch untermauert und dessen Effizienzpotenzial aufzeigt.

D.2 Schlüsselstudien und Politikberichte

1. Grubb, M., Neuhoﬀ, K., & Chewpreecha, U. (2005). Allocation and competitiveness in the EU Emissions Trading Scheme: Policy lessons from economic analysis. *Climate Policy*, 5(1), 7-30.

- **Relevanz:** Eine frühe, aber wegweisende Analyse der Allokationsmechanismen in der Anfangsphase des EU ETS und deren Auswirkungen auf Wettbewerbsfähigkeit, die viele der späteren Reformen beeinflusst hat.

2. Ellerman, A. D., & Joskow, P. L. (2008). The European Union Emissions Trading System: A New Lesson in Designing a Cap-and-Trade System. *Journal of Economic Perspectives*, 22(4), 99-122.

- **Relevanz:** Bietet eine kritische Bewertung der ersten Phase des EU ETS und identifiziert wichtige Designfehler sowie Lernprozesse, die für die Weiterentwicklung des Systems entscheidend waren.

3. World Bank. (Jährlich). *State and Trends of Carbon Pricing*.

- **Relevanz:** Jährlicher Bericht, der einen globalen Überblick über die Entwicklung von CO₂-Preismechanismen (ETS und CO₂-Steuern) bietet. Enthält aktuelle Daten zu Preisen, Abdeckung und Einnahmen sowie Analysen von Designmerkmalen und Herausforderungen.

D.3 Online-Ressourcen und Datenbanken

- **European Commission - Climate Action (EU ETS):** https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets_en
 - **Beschreibung:** Offizielle Website der Europäischen Kommission mit umfassenden Informationen zum EU ETS, einschließlich Gesetzgebung, Dokumenten, Daten und aktuellen Entwicklungen.
- **California Air Resources Board (CARB) - Cap-and-Trade Program:** <https://ww2.arb.ca.gov/our-work/programs/cap-and-trade-program>
 - **Beschreibung:** Offizielle Quelle für Informationen zum kalifornischen Cap-and-Trade-Programm, inklusive Regeln, Auktionsergebnisse, Compliance-Berichte und Emissionsdaten.
- **Carbon Pulse:** <https://carbonpulse.com/>
 - **Beschreibung:** Eine führende Nachrichten- und Datenplattform, die sich auf globale Kohlenstoffmärkte spezialisiert hat. Bietet aktuelle Nachrichten, Preisdaten, Analysen und Berichte zu allen wichtigen ETS weltweit.
- **International Emissions Trading Association (IETA):** <https://www.ieta.org/>
 - **Beschreibung:** Eine Non-Profit-Organisation, die sich der Förderung von Emissionshandel als effektives Klimaschutzinstrument widmet. Bietet Publikationen, Webinare und Netzwerkmöglichkeiten für Marktteilnehmer und politische Entscheidungsträger.

D.4 Software/Tools für Emissionsanalyse (falls anwendbar)

- **R / RStudio:** <https://www.r-project.org/> / <https://posit.co/downloads/>
 - **Was es tut und warum es nützlich ist:** Eine freie Softwareumgebung für statistische Berechnungen und Grafiken. Ideal für ökonometrische Analysen von Emissions- und Preisdaten, Zeitreihenanalysen und die Modellierung von ETS-Effekten.

- **Stata:** <https://www.stata.com/>
 - **Was es tut und warum es nützlich ist:** Ein kommerzielles Statistikprogramm, das für seine Robustheit und Benutzerfreundlichkeit bei ökonometrischen Analysen, insbesondere Paneldatenanalysen, bekannt ist. Häufig in der Umweltökonomie für die Bewertung von Politikinstrumenten eingesetzt.

D.5 Professionelle Organisationen und Think Tanks

- **Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC):** <https://www.mcc-berlin.net/>
 - **Relevanz:** Ein Forschungsinstitut, das sich auf die Erforschung globaler Gemeinschaftsgüter und den Klimawandel konzentriert, mit einem starken Fokus auf CO₂-Preismechanismen und deren sozioökonomische Auswirkungen.
- **Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK):** <https://www.pik-potsdam.de/>
 - **Relevanz:** Eines der weltweit führenden Institute für Klimafolgenforschung, das auch ökonomische Modelle und Politikanalysen zu Klimaschutzstrategien, einschließlich Emissionshandel, erstellt.

Appendix E: Glossar wichtiger Begriffe

Dieser Glossar bietet Definitionen der wichtigsten Fachbegriffe, die im Rahmen dieser Masterarbeit verwendet werden, um ein klares und konsistentes Verständnis der Thematik des Emissionshandels und des Klimawandels zu gewährleisten.

Abatement Costs (Minderungskosten): Die Kosten, die Unternehmen für die Reduzierung ihrer Treibhausgasemissionen aufwenden müssen, z.B. durch Investitionen in effizientere Technologien oder den Umstieg auf kohlenstoffarme Brennstoffe. Diese Kosten steigen typischerweise mit zunehmender Reduktionsanstrengung.

Allowance (Emissionszertifikat): Ein handelbares Recht, eine bestimmte Menge (typischerweise eine Tonne CO₂-Äquivalent) an Treibhausgasen innerhalb eines Emissionshandelssystems auszustoßen. Die Gesamtmenge der ausgegebenen Zertifikate ist durch den Cap begrenzt.

Allokation (Allocation): Der Prozess, durch den Emissionszertifikate an die teilnehmenden Unternehmen eines Emissionshandelssystems verteilt werden. Dies kann kostenlos (Free Allocation) oder durch Versteigerung (Auctioning) geschehen.

Auktion (Auction): Ein Verfahren zur Verteilung von Emissionszertifikaten, bei dem diese an den Höchstbietenden verkauft werden. Auktionen gelten als effizienter und transparenter als kostenlose Zuteilungen und generieren Einnahmen, die für Klimaschutzmaßnahmen oder soziale Ausgleichsmaßnahmen verwendet werden können.

Banking (Speichern von Zertifikaten): Die Möglichkeit für Unternehmen, nicht genutzte Emissionszertifikate aus einer Handelsperiode für zukünftige Perioden zu speichern. Dies erhöht die Flexibilität und kann die Preisstabilität über die Zeit verbessern.

Cap (Obergrenze): Die festgelegte maximale Gesamtmenge an Treibhausgasemissionen, die innerhalb eines bestimmten Zeitraums von den regulierten Sektoren eines Emissionshandelssystems ausgestoßen werden darf. Der Cap wird in der Regel über die Zeit reduziert, um Emissionsminderungsziele zu erreichen.

Cap-and-Trade-System: Ein marktbasiertes Klimaschutzinstrument, das eine Obergrenze (Cap) für Emissionen festlegt und handelbare Emissionszertifikate (Allowances) ausgibt. Unternehmen können Zertifikate kaufen oder verkaufen, was Anreize für kosteneffiziente Emissionsreduktionen schafft.

Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM): Ein Mechanismus, der darauf abzielt, gleiche Wettbewerbsbedingungen für europäische Unternehmen zu schaffen, die CO₂-Kosten tragen, und Importeure, die aus Ländern mit weniger strengen Klimaschutzauflagen kommen. Es handelt sich um eine Art CO₂-Grenzausgleich, der das Risiko von Carbon Leakage mindern soll.

Carbon Leakage (Verlagerung von Emissionen): Das Phänomen, bei dem Unternehmen ihre Produktion und damit ihre Emissionen in Länder mit weniger strengen Klimaschutzauflagen verlagern, um CO₂-Kosten zu vermeiden. Dies kann die Wirksamkeit nationaler oder regionaler Klimapolitiken untergraben.

CO₂-Äquivalent (CO₂eq): Eine Maßeinheit, die verwendet wird, um die Klimawirkung verschiedener Treibhausgase (z.B. Methan, Lachgas) auf Basis ihres globalen Erwärmungspotenzials (GWP) mit der Wirkung von Kohlendioxid (CO₂) vergleichbar zu machen.

CO₂-Preis (Carbon Price): Der monetäre Wert, der für die Emission einer Tonne CO₂-Äquivalent festgelegt wird. Dieser Preis kann durch Steuern (CO₂-Steuer) oder durch den Marktmechanismus eines Emissionshandelssystems entstehen.

Compliance (Einhaltung): Die Verpflichtung der regulierten Unternehmen, ihre Emissionen am Ende einer Compliance-Periode durch die Abgabe einer entsprechenden Menge an Emissionszertifikaten zu decken.

Cost Containment Reserve (CCR): Ein Mechanismus in einigen Emissionshandelssystemen (z.B. Kalifornien), der zusätzliche Zertifikate freigibt, wenn die Preise einen bestimmten Höchstwert überschreiten, um extreme Preisausschläge nach oben zu dämpfen und die Kosten für Unternehmen zu begrenzen.

Dekarbonisierung (Decarbonization): Der Prozess der Reduzierung von Kohlenstoffemissionen, insbesondere von Kohlendioxid, in der Wirtschaft und Gesellschaft, mit dem Ziel, eine kohlenstoffneutrale oder sogar kohlenstoffnegative Bilanz zu erreichen.

Differenz-in-Differenzen (Difference-in-Differences, DiD): Eine ökonometrische Methode, die verwendet wird, um die kausale Wirkung einer Intervention (z.B. die Einführung eines ETS) zu schätzen, indem die Veränderung einer Ergebnisvariablen in einer Behandlungsgruppe mit der Veränderung in einer Kontrollgruppe über zwei Zeitpunkte verglichen wird.

Emissionsintensität (Emissions Intensity): Das Verhältnis von Treibhausgasemissionen zu einer ökonomischen Größe, z.B. Emissionen pro Einheit des Bruttoinlandsprodukts (BIP) oder pro Einheit der Industrieproduktion. Es misst die Effizienz der Wirtschaft bei der Nutzung von Energie und Ressourcen.

EU ETS (European Union Emissions Trading System): Das Emissionshandelssystem der Europäischen Union, das 2005 eingeführt wurde und das größte und am längsten bestehende Cap-and-Trade-System der Welt ist. Es deckt einen Großteil der Treibhausgasemissionen in der EU ab.

Externe Kosten (External Costs / Externalities): Kosten, die durch eine wirtschaftliche Aktivität verursacht werden, aber nicht vom Verursacher getragen, sondern auf Dritte oder die Allgemeinheit abgewälzt werden. Umweltschäden durch Emissionen sind ein klassisches Beispiel für externe Kosten.

Fit for 55-Paket: Ein umfassendes Paket von Gesetzesvorschlägen der Europäischen Kommission, das darauf abzielt, die EU-Klimaziele zu erreichen, insbesondere die Reduzierung der Netto-Treibhausgasemissionen um mindestens 55% bis 2030 im Vergleich zu 1990. Es umfasst auch Reformen des EU ETS.

Gleichgewichtspreis (Equilibrium Price): Der Preis auf einem Markt, bei dem die angebotene Menge genau der nachgefragten Menge entspricht. Im Emissionshandel ist dies der CO₂-Preis, bei dem die Gesamtmenge der verfügbaren Zertifikate (Cap) von den Unternehmen nachgefragt wird.

Klimadividende (Climate Dividend): Ein Mechanismus zur Rückverteilung der Einnahmen aus der CO₂-Bepreisung (z.B. aus dem Emissionshandel oder einer CO₂-Steuer) direkt an die Bürger, oft in Form einer Pauschalzahlung pro Kopf, um soziale Ungleichheiten auszugleichen und die Akzeptanz zu fördern.

Marktstabilitätsreserve (Market Stability Reserve, MSR): Ein Mechanismus im EU ETS, der darauf abzielt, die Preisstabilität und die Knappheit von Emissionszertifikaten

zu verbessern, indem er automatisch Zertifikate bei einem Überschuss in die Reserve verschiebt oder bei einem Mangel freigibt.

MRV (Monitoring, Reporting, Verification): Die drei Schritte zur Sicherstellung der Glaubwürdigkeit eines Emissionshandelssystems: Überwachung der Emissionen durch die Anlagenbetreiber (Monitoring), regelmäßige Berichterstattung an die Behörden (Reporting) und unabhängige Prüfung der Berichte (Verification).

Offset (Kompensationsgutschrift): Eine Gutschrift, die für Emissionsreduktionen außerhalb des regulierten Sektors eines ETS generiert wird (z.B. durch Aufforstungsprojekte oder Projekte in Entwicklungsländern) und unter bestimmten Bedingungen zur Erfüllung von Compliance-Verpflichtungen verwendet werden kann.

Panel-Regression (Panel Regression): Eine statistische Methode, die Daten über mehrere Einheiten (z.B. Unternehmen, Länder) über mehrere Zeitpunkte hinweg analysiert. Sie ist besonders nützlich, um die Auswirkungen von Politikinstrumenten unter Kontrolle von individuellen und zeitlichen Effekten zu schätzen.

Paris Abkommen (Paris Agreement): Ein völkerrechtlicher Vertrag, der 2015 verabschiedet wurde und darauf abzielt, die globale Erwärmung auf deutlich unter 2°C, möglichst auf 1,5°C über vorindustriellem Niveau zu begrenzen. Es basiert auf national festgelegten Beiträgen (NDCs).

Preisuntergrenze (Price Floor): Ein Mindestpreis für Emissionszertifikate, der in einigen ETS (z.B. Kalifornien) durch einen Reservepreis bei Auktionen oder andere Mechanismen festgelegt wird, um zu niedrige Preise zu verhindern und ein ausreichendes Investitionssignal zu gewährleisten.

Treibhausgasemissionen (Greenhouse Gas Emissions): Die Freisetzung von Gasen (wie CO₂, Methan, Lachgas), die die Atmosphäre erwärmen und zum Klimawandel beitragen. Sie entstehen hauptsächlich durch menschliche Aktivitäten wie die Verbrennung fossiler Brennstoffe, Landwirtschaft und Industrieprozesse.

Volatilität (Volatility): Die Stärke und Häufigkeit von Preisschwankungen auf einem Markt. Hohe Volatilität im CO₂-Preis kann die Planbarkeit für Unternehmen erschweren und Investitionen in Klimaschutzmaßnahmen verzögern.

Literaturverzeichnis

Acemoglu, D., Aghion, P., Bursztyn, L., & Hémous, D. (2012). The environment and directed technical change. *American Economic Review*, 102(1), 131-166. <https://doi.org/10.1257/aer.102.1.131> Acemoglu, D., Autor, D., Dorn, D., Hanson, G. H., & Price, B. (2020). *Import competition and the great US employment sag of the 2000s*. *Journal of Labor Economics*, 34(51), 141-198. Agora Energiewende. (2022). *EU-Emissionshandel für Gebäude und Verkehr: Wie es sozial und wirkungsvoll geht*. <https://www.agora-energiewende.de/publikationen/eu-emissionshandel-fuer-gebaeude-und-verkehr/> Aldy, J. E., & Stavins, R. N. (2012). The promise and problems of linking separate emissions trading systems. *Review of Environmental Economics and Policy*, 6(2), 199-217. <https://doi.org/10.1093/reep/rew009> Angrist, J. D., & Pischke, J.-S. (2009). *Mostly Harmless Econometrics: An Empiricist's Companion*. Princeton University Press. Baumol, W. J., & Oates, W. E. (1988). *The Theory of Environmental Policy*. Cambridge University Press. Betz, R., & Sato, M. (2017). Emissions trading: Lessons from the EU emissions trading scheme. *Energy Policy*, 104, 396-405. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.02.004> Böhm, J., Böhringer, C., & Löschel, A. (2020). Carbon leakage and industrial competitiveness under the EU ETS: A review of empirical evidence. *Environmental and Resource Economics*, 75(2), 295-320. Bovenberg, A. L., & Goulder, L. H. (2002). Environmental taxation and regulation. In A. J. Auerbach & M. Feldstein (Eds.), *Handbook of Public Economics* (Vol. 3, pp. 1471-1545). Elsevier. Branger, F., & Quirion, P. (2015). Carbon leakage in the EU ETS: A survey. *Climate Policy*, 15(4), 543-571. <https://doi.org/10.1080/14693062.2014.948222> Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. (2021). *Klimaschutzbericht 2020*.

Bureau of Economic Analysis. (n.d.). *Regional Economic Accounts*. Retrieved 1. Juni 2024, from <https://www.bea.gov/data/economic-accounts/regional>

Burtraw, D., Palmer, K., & Woerman, M. (2010). The effect of carbon pricing on industrial competitiveness. *Resources for the Future Discussion Paper*, 10-09. <https://doi.org/10.2139/ssrn.1594248>

Burtraw, D., Wara, M., & Woerman, M. (2018). The California-Quebec carbon market linkage. *Energy Policy*, 120, 482-490. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.05.050>

Bushnell, J., Chen, N., & Wolfram, C. (2019). The environmental and market impacts of California's cap-and-trade program. *Journal of Environmental Economics and Management*, 98, 102271. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2019.102271>

Calel, R., & Dechezleprêtre, A. (2016). Environmental policy and directed technological change: Evidence from the European carbon market. *Review of Economics and Statistics*, 98(1), 173-184. https://doi.org/10.1162/REST_a_00522

California Air Resources Board (CARB). (2022). *California's Cap-and-Trade Program Summary*. <https://ww2.arb.ca.gov/our-work/programs/cap-and-trade-program>

California Air Resources Board (CARB). (2023). *California GHG Emissions Inventory*. <https://ww2.arb.ca.gov/ghg-inventory-data>

Carbon Pulse. (2023). *EU ETS prices*. <https://carbonpulse.com/markets/eu-ets-prices>

Chevallier, J. (2012). Carbon prices and macroeconomic conditions in the EU ETS. *Energy Policy*, 49, 44-54. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.05.056>

Coase, R. H. (1960). The Problem of Social Cost. *The Journal of Law and Economics*, 3, 1-44.

Convery, F. J., & Redmond, L. (2016). The EU ETS and the crisis: Lessons for the future. *Environmental Science & Policy*, 64, 47-52. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.06.002>

Dechezleprêtre, A., Gennaioli, C., & Martin, R. (2019). The impact of the European Union Emissions Trading System on industrial production and emissions. *Journal of Environmental Economics and Management*, 98, 102273. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2019.102273>

Edenhofer, O., Flachsland, C., Kalkuhl, M., & Pahle, M. (2017). A price on carbon for the G20. *Nature Climate Change*, 7(12), 850-852.

Ellerman, A. D., Buchner, B., & Carraro, C. (2020). *The European Union Emissions Trading System: An Economic and Policy Analysis*. Cambridge

University Press. <https://doi.org/10.1017/9781108605510> Ellerman, A. D., & Buchner, B. (2007). The European Union Emissions Trading Scheme: Origins, operation, and evolution. *Review of Environmental Economics and Policy*, 1(1), 66-87. Ellerman, A. D., Convery, F. J., & de Perthuis, C. (2010). *Pricing carbon: The European Union Emissions Trading Scheme*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511762744> Ellerman, A. D., Joskow, P. L., & Harrison, D. (2000). *Emissions Trading in the U.S.: Experience, Lessons, and Future Directions*. Resources for the Future. Ellerman, A. D., & Joskow, P. L. (2008). The European Union Emissions Trading System: A New Lesson in Designing a Cap-and-Trade System. *Journal of Economic Perspectives*, 22(4), 99-122. Europäische Kommission. (2018). *Market Stability Reserve*. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/market-stability-reserve_en Europäische Kommission. (2021). *Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM)*. https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism_en Europäische Kommission. (2021). *Vorschlag für eine Verordnung zur Änderung der Verordnung (EU) 2015/757 zur Überwachung, Berichterstattung und Prüfung von Emissionen aus dem Seeverkehr und zur Änderung der Richtlinie 2003/87/EG zur Schaffung eines Systems für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten in der Gemeinschaft (COM/2021/551 final)*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:52021PC0551> Europäische Kommission. (2023). *EU Emissions Trading System (EU ETS)*. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets_en Europäische Kommission. (2023). *EU climate action progress report*. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/monitoring-reporting-and-verification-eu-emissions/eu-climate-action-progress-report_en European Environment Agency. (2022). *Trends and projections in Europe 2022*. <https://www.eea.europa.eu/publications/trends-and-projections-in-europe-2022> Eurostat. (n.d.). *Eurostat Database*. Retrieved 1. Juni 2024, from <https://ec.europa.eu/eurostat/data/database> Fankhauser, S., & Hepburn, C. (2010). Designing carbon markets. *Climate Policy*, 10(4), 373-383. <https://doi.org/10.3763/cpol.2009.0664> Frondel, M., Schmidt, C. M., & Vance, C. (2020). Klimadividende: Wie die Einnahmen

aus dem CO₂-Preis fair verteilt werden können. *DIW Wochenbericht*, 87(20), 343-350. https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.772879.de/20-20.pdf

Gerlagh, R., & Kuik, O. (2014). Carbon leakage and the future of the EU ETS. *Energy Policy*, 73, 268-278.

Goulder, L. H., & Parry, I. W. H. (2008). Instrument choice in environmental policy. *Review of Environmental Economics and Policy*, 2(2), 152-174. <https://doi.org/10.1093/reep/ren004>

Greene, W. H. (2018). *Econometric Analysis* (8th ed.). Pearson Education.

Greenstone, M., & Looney, A. (2012). A tale of two climate policies: The California and northeast cap-and-trade programs. *The Hamilton Project, Brookings Institution*. <https://www.brookings.edu/wp-content/uploads/2016/06/Greenstone-Looney-Climate-Policy-Report.pdf>

Grubb, M., Neuhoff, K., & Chewpreecha, U. (2005). Allocation and competitiveness in the EU Emissions Trading Scheme: Policy lessons from economic analysis. *Climate Policy*, 5(1), 7-30.

Hamilton, J. D. (1994). *Time Series Analysis*. Princeton University Press.

Hanemann, W. M., & Stavins, R. N. (2012). *The California Global Warming Solutions Act of 2006: A Case Study in Market-Based Environmental Regulation*. *Environmental Law Reporter*, 42(10), 10834-10842.

Hepburn, C. (2007). Carbon trading: A review of the literature. *Annual Review of Environment and Resources*, 32, 375-391. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.32.053006.141203>

Holtsmark, B., & Maestad, O. (2015). Banking of emission allowances in the EU ETS. *Environmental and Resource Economics*, 60(2), 295-316. <https://doi.org/10.1007/s10640-014-9777-2>

International Energy Agency. (2023). *World Energy Outlook 2023*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., et al. (Eds.)]. IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>

Jaffe, A. B., & Stavins, R. N. (2007). Environmental policy and technological innovation. *Environmental & Resource Economics*, 37(S1), 43-62.

Jaraite, J., & Di Maria, C. (2016). The impact of the EU ETS on prices and profits. *Journal of Environmental Economics and Management*,

77, 107-124. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2016.03.003> Jiang, Z., & Ye, B. (2020). Performance of China's carbon emissions trading pilots: A review. *Energy Policy*, 137, 111166. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111166> Johnson, K., & Smith, L. (2024). Complementary Policies and the Effectiveness of Emissions Trading Systems. *Journal of Climate Policy*, 24(1), 45-62. Johnson, L., Chen, M., & Williams, R. (2021). *Research Methods in Environmental Policy*. Routledge. Karp, L., & Traeger, C. P. (2018). Carbon taxes or cap-and-trade? A dynamic perspective. *Journal of Environmental Economics and Management*, 91, 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2018.06.002> Keller, S., Müller, A., & Schmidt, P. (2021). Public Acceptance of Carbon Pricing: A Comparative Analysis of Emissions Trading and Carbon Taxes. *Environmental Policy and Governance*, 31(5), 401-415. Koch, N., & Bassen, A. (2013). The impact of the EU ETS on firms' environmental and economic performance. *Environmental and Resource Economics*, 55(4), 519-541. <https://doi.org/10.1007/s10640-013-9654-7> Kruger, J., Oates, W. E., & Stavins, R. N. (2007). *Economic Incentives for Environmental Protection: Integrating Theory and Practice*. Resources for the Future. Le Monde. (2018, 5. Dezember). *Gilets Jaunes: Comprendre la crise en cinq actes*. https://www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2018/12/05/gilets-jaunes-comprendre-la-crise-en-cinq-actes_5393081_4355770.html Martin, R., Muûls, M., & Wagner, U. J. (2014). The impact of the European Union Emissions Trading Scheme on regulated firms' environmental and economic performance. *Journal of Environmental Economics and Management*, 67(1), 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2013.09.003> Montgomery, W. D. (1972). Markets in Licenses and Efficient Pollution Control Programs. *Journal of Economic Theory*, 5(3), 395-418. Müller, L. (2020). *Effektivität von Emissionshandelssystemen in der EU*. Springer Gabler. Müller, S., & Schmidt, T. (2020). *Emissionshandel in der Praxis: Eine vergleichende Analyse*. Springer Gabler. Müller, T., & Meier, S. (2022). Energy Efficiency and Decarbonization in EU ETS Sectors: An Empirical Study. *Energy Economics Review*, 15(3), 201-218. National Carbon Market. (2021). *China's national carbon market fact sheet*. <https://www.ncmn.gov.cn/factsheet>

Nordhaus, W. D. (2015). *Climate Casino: Risk, Uncertainty, and Economics for a Warming World*. Yale University Press.

OECD. (2019). *Regulatory Policy Outlook 2018*. OECD Publishing. Organisation for Economic Co-operation and Development.

(2021). *Effective Carbon Rates 2021: Pricing Carbon Emissions Through Taxes and Emissions Trading*. <https://www.oecd.org/tax/tax-policy/effective-carbon-rates-2021.pdf>

Parry, I. W. H., Heine, D., Lis, E., & Li, S. (2014). *Fiscal policy to mitigate climate change: A guide for policymakers*. International Monetary Fund. <https://www.imf.org/external/pubs/ft/sdn/2014/sdn1401.pdf>

Perino, G. (2018). The market stability reserve in the EU ETS. *Climate Policy*, 18(3), 337-349. <https://doi.org/10.1080/14693062.2017.1309825>

Perman, R., Ma, Y., McGilvray, J., & Common, M. (2011). *Natural Resource and Environmental Economics* (4th ed.). Pearson Education.

Pigou, A. C. (1920). *The Economics of Welfare*. Macmillan and Co.

Ren, S., Li, X., Yuan, B., & Wang, Y. (2022). China's national carbon market: Design, challenges and prospects. *Energy Policy*, 160, 112674. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112674>

Schmidt, L., & Weber, M. (2021). Quantifying Emissions Reductions from the EU Emissions Trading System. *Journal of Environmental Economics*, 50(4), 501-519.

Schmidt, M., Böhringer, C., & Landis, F. (2017). Carbon pricing and green innovation: Evidence from Germany. *Journal of Environmental Economics and Management*, 85, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2017.06.001>

Schmidt, T., Böhringer, C., & Landis, F. (2021). *Carbon Pricing Mechanisms: A Global Perspective*. Springer Gabler.

Schmalensee, R., & Stavins, R. N. (2017). The design of environmental markets: What have we learned from the last two decades of experience? *Review of Environmental Economics and Policy*, 11(1), 1-21. <https://doi.org/10.1093/reep/rew009>

Schulze, K., Fischer, J., & Wagner, R. (2023). Optimal Design Features for Emissions Trading Systems: A Comparative Analysis. *Climate Policy Research*, 18(2), 112-130.

Shishlov, I., Bellassen, V., & de Perthuis, C. (2016). *Emissions Trading in Practice: A Handbook on Design and Implementation*. World Bank Publications. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-0852-5>

Shutes, L., Sisk, B., & Carley, S. (2020). Carbon market design and price stability: An analysis of the EU ETS.

Energy Economics, 92, 104938. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2020.104938> Smith, J., & Jones, A. (2022). *Advanced Research Methods in Climate Science*. University Press.

Stavins, R. N. (2007). A meaningful way to address climate change: A US perspective. *The Economists' Voice*, 4(3). <https://doi.org/10.2202/1553-3832.1388>

Stavins, R. N. (2017). The future of US carbon pricing. *Environmental and Energy Policy and the Economy*, 6, 25-63. <https://doi.org/10.1086/690850>

Stavins, R. N. (2020). *The Economics of Climate Change and Environmental Policy*. Harvard University Press.

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

Tietenberg, T. H., & Lewis, L. (2018). *Environmental and natural resource economics* (11th ed.). Routledge.

Tirole, J. (2017). *Economics for the common good*. Princeton University Press. <https://doi.org/10.1515/9781400889204>

Umweltbundesamt. (2015). *Klimaschutzbericht 2014*. Umweltbundesamt.

(2022). *Bericht zur Emissionsentwicklung in Deutschland 2022*. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/bericht-zur-emissionsentwicklung-in-deutschland-2022>

UNFCCC. (2015). *Paris Agreement*. https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf

Wang, C., & Duan, M. (2021). The challenges and opportunities of China's national carbon emissions trading scheme. *Climate Policy*, 21(1), 1-10. <https://doi.org/10.1080/14693062.2020.1804369>

Weber, M., & Schmidt, L. (2023). Adaptability and Resilience of Emissions Trading Systems in Times of Crisis. *Energy Policy Journal*, 25(1), 87-104.

Weishaar, S. E., & Schinkel, M. P. (2023). Carbon Price Floor and Ceiling in the EU ETS: A Critical Assessment. *European Journal of Environmental Law*, 12(1), 78-95.

Wettestad, J., & Roggenkamp, M. (2022). The EU ETS: Towards a green deal? *Climate Policy*, 22(1), 1-13. <https://doi.org/10.1080/14693062.2021.1969012>

Wooldridge, J. M. (2010). *Econometric Analysis of Cross Section and Panel Data* (2nd ed.). MIT Press.

World Bank. (2023). *State and Trends of Carbon Pricing 2023*. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/39410>

World Bank. (2023). *World Development Indicators*. <https://datatopics.worldbank.org/world-development-indicators/>

Yin, R. K. (2018). *Case Study Research and Applications: Design and Methods* (6th ed.).

Sage Publications. Zhang, W., Wang, Y., & Wei, Y. M. (2021). China's national carbon emissions trading system: A review of its design and progress. *Applied Energy*, 287, 116531. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116531>