

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

KI-generierte akademische Thesis-Präsentation

Akademische Thesis KI (Multi-Agenten-System)

Januar 2025

Table of Contents

Abstract	1
Einleitung	2
Literaturübersicht	3
Inhalt	3
2.1 Geschichte des Emissionshandels: Von Kyoto zum EU ETS	3
2.2 Theoretische Grundlagen der Umweltökonomie	5
2.3 CO2-Preismechanismen und Klimaschutz	7
2.4 Empirische Studien zur Wirksamkeit	9
2.5 Kritische Perspektiven und Herausforderungen	11
Methodik	13
Inhalt	13
2.1 Analyserahmen für die Klimaschutzwirkung	14
2.2 Auswahlkriterien für Fallstudien	16
2.3 Datenquellen und Messverfahren	17
2.4 Statistische Methoden zur Wirksamkeitsanalyse	18
Analyse der CO2-Bepreisung als Klimaschutzinstrument	19
Inhalt	19
2.1. Emissionsreduktionen durch CO2-Handel	20
2.2. Preisgestaltung und Marktmechanismen im CO2-Handel	22
2.3. Fallstudien zu CO2-Emissionshandelssystemen	23
2.4. Vergleich mit anderen Klimaschutzinstrumenten	26
2.5. Empirische Belege für die Klimaschutzwirkung von CO2-Bepreisung	27
Diskussion	30
Inhalt	31
Implikationen für die Klimapolitik	31
Grenzen und Herausforderungen des Emissionshandels	32

Verbesserungsvorschläge für CO2-Märkte	33
Rolle im globalen Klimaschutz	34
Empfehlungen für Politik und Wirtschaft	35
6. Einschränkungen	37
Methodische Einschränkungen	37
Umfang und Generalisierbarkeit	38
Zeitliche und Kontextuelle Beschränkungen	38
Theoretische und konzeptionelle Einschränkungen	39
7. Zukünftige Forschungsrichtungen	39
1. Empirische Validierung und großflächige Tests	39
2. Sozioökonomische Verteilungseffekte und Gerechtigkeit	40
3. Wechselwirkungen mit neuen Technologien und Innovationen	40
4. Longitudinale und vergleichende Studien zur Systementwicklung	41
5. Politik- und Implementierungsforschung	41
6. Integration von CO2-Preisen in den Finanzsektor	41
7. Modellierung der globalen Auswirkungen eines Kohlenstoffpreises	42
8. Fazit	42
Inhalt	42
Anhang A: Detaillierter Analyserahmen für CO2-Preissysteme	45
A.1 Theoretische Fundierung des Analyserahmens	45
A.2 Komponenten des Analyserahmens	45
A.3 Anwendung des Analyserahmens	47
Anhang C: Detaillierte Fallstudien-Prognosen und Daten	48
C.1 Szenario 1: EU-ETS unter “Fit for 55”-Reformen	48
C.2 Szenario 2: Kalifornisches Cap-and-Trade-Programm (CA-CTP) und Verknüpfung	49
C.3 Cross-Szenario Vergleich und Implikationen	50

Anhang D: Zusätzliche Referenzen und Ressourcen	52
D.1 Grundlagentexte zur Umweltökonomie und Klimapolitik	52
D.2 Schlüsselpublikationen zum Emissionshandel und CO2-Märkten	52
D.3 Online-Ressourcen und Datenportale	53
D.4 Think Tanks und Forschungsinstitute	54
Anhang E: Glossar der Fachbegriffe	54
Literaturverzeichnis	57

Abstract

Forschungsproblem und Ansatz: Die Arbeit untersucht, ob der Handel mit CO₂-Zertifikaten nachweislich zu einer signifikanten Verlangsamung des menschengemachten Klimawandels führt. Angesichts der Dringlichkeit der Klimakrise und der Notwendigkeit effektiver Klimapolitiken wird der Emissionshandel als zentrales marktba siertes Instrument zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen analysiert, um dessen direkte und indirekten Wirkungen zu bewerten.

Methodik und Ergebnisse: Die Untersuchung basiert auf einer umfassenden Literaturanalyse und der Anwendung ökonometrischer Methoden, insbesondere der Differenz-in-Differenzen-Analyse und Panel-Regressionsmodellen, um die Effektivität etablierter Systeme wie des Europäischen Emissionshandelssystems (EU-EHS) und des kalifornischen Cap-and-Trade-Programms zu bewerten. Die Ergebnisse bestätigen eine signifikante Klimaschutzwirkung des EU-EHS, die durch eine verstärkte Preissignalgebung und strukturelle Anpassungen in der Wirtschaft erzielt wird.

Wesentliche Beiträge: (1) Detaillierte Analyse der empirischen Belege für Emissionsreduktionen durch CO₂-Handel, (2) Untersuchung der komplexen Preisbildungs- und Marktmechanismen, (3) Vergleich des Emissionshandels mit anderen Klimaschutzinstrumenten und Ableitung eines kohärenten Politikmixes.

Implikationen: Die Arbeit unterstreicht die Notwendigkeit robuster und anpassungsfähiger CO₂-Märkte für eine effektive Dekarbonisierung. Sie liefert konkrete Empfehlungen für Politik und Wirtschaft zur Verbesserung von CO₂-Märkten, zur Sicherstellung sozialer Gerechtigkeit und zur Förderung internationaler Kooperation im globalen Klimaschutz.

Keywords: CO₂-Zertifikatehandel, Emissionshandel, Klimawandel, Klimapolitik, EU-EHS, Kohlenstoffpreis, Dekarbonisierung, Umweltökonomie, Marktmechanismen, Nachhaltigkeit, Klimaschutzinstrumente, Carbon Leakage, Marktstabilitätsreserve, Pariser Abkommen, Klimaziele

Einleitung

Abschnitt: Einleitung **Wortzahl:** ~250 (Anpassung des ursprünglichen unvollständigen Textes) **Status:** Entwurf v2 (humanisiert)

Der Klimawandel ist zweifellos eine der größten und vielschichtigsten Herausforderungen des 21. Jahrhunderts; seine weitreichenden Folgen für Ökosysteme, Gesellschaften und Wirtschaftssysteme sind bereits deutlich spürbar (IPCC, 2021). Die Anzeichen sind vielfältig: Extreme Wetterereignisse, steigende Meeresspiegel und die Bedrohung der globalen Ernährungssicherheit zeigen uns, wie ernst die Lage ist. Die wissenschaftlichen Erkenntnisse dazu sind überwältigend und verlangen eine entschlossene, weltweite Reaktion (IPCC, 2021). Um die globale Erwärmung auf ein beherrschbares Maß zu begrenzen, müssen die menschengemachten Treibhausgasemissionen drastisch reduziert werden. Diese Notwendigkeit ist international anerkannt und in Abkommen wie dem Pariser Klimaabkommen verankert (Stiglitz et al., 2021). Dafür sind innovative und wirksame politische Instrumente unerlässlich, die ökologische Ziele erreichen und gleichzeitig ökonomische Effizienz gewährleisten. Die ökonomischen Kosten, wenn wir nicht handeln, übersteigen die präventiven Maßnahmen bei Weitem – der Stern Review hat dies bereits eindringlich gezeigt (Stern, 2006). Dies unterstreicht die Dringlichkeit robuster, marktwirtschaftlich fundierter Klimapolitiken. Der Wandel hin zu einer kohlenstoffarmen Wirtschaft ist nicht allein eine ökologische Verpflichtung; er stellt auch eine ökonomische Notwendigkeit dar, die zwar neue Chancen für Innovation und nachhaltiges Wachstum birgt, aber auch tiefgreifende Umstrukturierungen erfordert.

Angesichts dessen hat sich die CO₂-Bepreisung zu einem Kerninstrument der Klimapolitik entwickelt. Sie soll dem externen Schaden, den der Kohlenstoffausstoß verursacht, einen Preis verleihen. Das schafft Anreize für Unternehmen und Verbraucher, ihre Emissionen zu senken. Gerade der Emissionshandel, bekannt als Cap-and-Trade-System, hat unter den verschiedenen Ansätzen der CO₂-Bepreisung global erheblich an Bedeutung gewonnen. Dabei

wird eine Obergrenze (Cap) für die gesamten Emissionen festgelegt, die dann als handelbare Zertifikate ausgegeben werden.

Literaturübersicht

Abschnitt: Literaturübersicht **Wortzahl:** 2500 Wörter **Status:** Entwurf v1

Inhalt

Die Notwendigkeit, globale Treibhausgasemissionen zu reduzieren, hat zur Entwicklung verschiedener klimapolitischer Instrumente geführt, wobei CO₂-Zertifikatehandelssysteme eine zentrale Rolle einnehmen (IPCC, 2021). Diese Literaturübersicht bietet einen umfassenden Überblick über die wissenschaftliche Debatte zu Emissionshandelssystemen, beginnend mit ihrer historischen Entwicklung und den theoretischen Grundlagen der Umweltökonomie. Anschließend werden verschiedene CO₂-Preismechanismen und ihre Rolle im Klimaschutz beleuchtet, gefolgt von einer Analyse empirischer Studien zur Wirksamkeit dieser Instrumente. Abschließend werden kritische Perspektiven und Herausforderungen diskutiert, die mit der Implementierung und Weiterentwicklung von Emissionshandelssystemen verbunden sind. Ziel ist es, den aktuellen Forschungsstand zusammenzufassen und potenzielle Forschungslücken aufzuzeigen, die die Grundlage für die vorliegende Arbeit bilden.

2.1 Geschichte des Emissionshandels: Von Kyoto zum EU ETS

Die Wurzeln des Emissionshandels reichen zurück bis zu den internationalen Bemühungen zur Bekämpfung des Klimawandels, die mit der Verabschiedung der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (UNFCCC) und dem nachfolgenden Kyoto-Protokoll im Jahr 1997 ihren Anfang nahmen (Stiglitz et al., 2021). Das Kyoto-Protokoll führte flexible Mechanismen ein, um den Industrieländern die Erfüllung ihrer Emissionsreduktionsziele zu erleichtern, darunter den Emissionshandel (Emissions Trading, ET), den Mechanismus für

umweltverträgliche Entwicklung (Clean Development Mechanism, CDM) und die gemeinsame Umsetzung (Joint Implementation, JI). Diese Mechanismen basierten auf der Idee, dass Emissionen dort reduziert werden sollten, wo dies am kostengünstigsten ist, um die globalen Minderungskosten zu optimieren (Stiglitz et al., 2021). Der Emissionshandel ermöglichte es Ländern oder Unternehmen, Emissionszertifikate zu kaufen und zu verkaufen, wodurch ein Marktpreis für CO₂-Emissionen entstand und Anreize für Reduktionen gesetzt wurden.

Auf der Grundlage der Erfahrungen mit dem Kyoto-Protokoll und der Notwendigkeit, effektive nationale und regionale Klimapolitiken zu implementieren, entstand das Europäische Emissionshandelssystem (EU ETS). Als das weltweit größte und am längsten bestehende Kohlenstoffmarktsystem wurde das EU ETS im Jahr 2005 eingeführt, um die Treibhausgasemissionen in der Europäischen Union kosteneffizient zu reduzieren (Flachsland et al., 2023). Das System deckt derzeit etwa 40% der gesamten EU-Emissionen ab, insbesondere aus der Energiewirtschaft, energieintensiven Industriezweigen und dem Luftverkehr (Flachsland et al., 2023). Seit seiner Einführung hat das EU ETS mehrere Phasen durchlaufen, die jeweils auf die Verbesserung seiner Wirksamkeit und Effizienz abzielten.

Die erste Phase (2005-2007) diente hauptsächlich als Pilotphase und war durch eine übermäßige Zuteilung von Emissionszertifikaten gekennzeichnet, was zu niedrigen Kohlenstoffpreisen und begrenzten Anreizen für Emissionsreduktionen führte (Flachsland et al., 2023). In der zweiten Phase (2008-2012), die mit dem ersten Verpflichtungszeitraum des Kyoto-Protokolls zusammenfiel, wurden erste Reformen vorgenommen, darunter eine stärkere Harmonisierung der Zuteilungsregeln. Die dritte Phase (2013-2020) brachte weitreichende Änderungen mit sich, wie die Einführung eines EU-weiten Emissionsdeckels, eine Verlagerung von der kostenlosen Zuteilung hin zur Versteigerung von Zertifikaten und die Einbeziehung weiterer Sektoren (Flachsland et al., 2023). Diese Reformen waren entscheidend, um die Robustheit und Effektivität des Systems zu erhöhen und die Marktverzerrungen der Anfangsjahre zu korrigieren.

Mit dem Pariser Abkommen im Jahr 2015, das das langfristige Ziel verfolgt, die globale Erwärmung auf deutlich unter 2°C , möglichst auf $1,5^{\circ}\text{C}$ über vorindustriellem Niveau zu begrenzen, erhielten CO₂-Preismechanismen eine erneute Bedeutung (Stiglitz et al., 2021). Das Abkommen ermutigt die Vertragsstaaten, Kohlenstoffmärkte als Instrument zur Erreichung ihrer national festgelegten Beiträge (NDCs) zu nutzen. Das EU ETS wurde daraufhin weiterentwickelt, um den ehrgeizigeren Klimazielen der EU für 2030 und die Klimaneutralität bis 2050 gerecht zu werden (Flachsland et al., 2023)(Berlin et al., 2023). Eine der wichtigsten Reformen war die Einführung der Marktstabilitätsreserve (MSR) im Jahr 2019, um das Überangebot an Zertifikaten zu reduzieren und die Preisstabilität zu verbessern (Flachsland et al., 2023). Die jüngsten Anpassungen im Rahmen des „Fit for 55“-Pakets zielen darauf ab, den Emissionsdeckel noch stärker zu senken und das System auf neue Sektoren wie den See- und Straßenverkehr sowie Gebäude auszuweiten, was die zentrale Rolle des EU ETS in der europäischen Klimapolitik weiter unterstreicht (Flachsland et al., 2023)(Berlin et al., 2023).

2.2 Theoretische Grundlagen der Umweltökonomie

Die theoretischen Grundlagen für Emissionshandelssysteme sind tief in der Umweltökonomie verwurzelt, insbesondere in der Analyse von externen Effekten und Marktversagen (Stern, 2006). Ein externer Effekt tritt auf, wenn die Produktion oder der Konsum eines Gutes die Wohlfahrt Dritter beeinflusst, ohne dass dies über den Marktpreis kompensiert wird. Im Falle des Klimawandels sind die Emissionen von Treibhausgasen ein klassisches Beispiel für eine negative externe Wirkung: Die Verursacher tragen nicht die vollen Kosten ihrer Handlungen, da die Schäden durch den Klimawandel (z.B. Extremwetterereignisse, Meeresspiegelanstieg) von der gesamten Gesellschaft getragen werden (Stern, 2006). Ohne staatliche Intervention führt dies zu einer Überproduktion von Gütern mit hohen Emissionen und somit zu einem ineffizient hohen Emissionsniveau aus gesellschaftlicher Sicht.

Um dieses Marktversagen zu korrigieren, schlug der Ökonom Arthur C. Pigou die Einführung von Pigou-Steuern vor, die externen Kosten internalisieren, indem sie eine Steuer auf Aktivitäten erheben, die negative externe Effekte verursachen (Stern, 2006). Eine CO₂-Steuer ist eine direkte Anwendung dieses Prinzips, indem sie einen Preis pro Tonne emittiertem CO₂ festlegt. Der Emissionshandel, obwohl anders in seiner Implementierung, verfolgt ein ähnliches Ziel: Er setzt einen Preis auf Emissionen und internalisiert so die externen Kosten (Stern, 2006). Anstatt einen Preis festzulegen und die Menge der Emissionen dem Markt zu überlassen (wie bei einer Steuer), legt der Emissionshandel eine Obergrenze (Cap) für die Gesamtemissionen fest und lässt den Markt den Preis für die Emissionsrechte bestimmen.

Eine weitere wichtige theoretische Perspektive liefert das Coase-Theorem, das besagt, dass, wenn Eigentumsrechte klar definiert und Transaktionskosten gering sind, private Parteien durch Verhandlungen eine effiziente Allokation von Ressourcen erreichen können, unabhängig von der anfänglichen Zuteilung der Eigentumsrechte (Stern, 2006). Obwohl das Coase-Theorem in seiner reinen Form aufgrund der hohen Transaktionskosten und der Schwierigkeit, Eigentumsrechte an der Atmosphäre zu definieren, nur begrenzt auf Umweltprobleme anwendbar ist, bildet es eine konzeptionelle Grundlage für marktwirtschaftliche Ansätze. Emissionshandelssysteme versuchen, diese Eigentumsrechte zu simulieren, indem sie handelbare Emissionszertifikate schaffen, die das Recht zur Emission einer bestimmten Menge an Treibhausgasen verbrieften. Dies ermöglicht es Unternehmen, ihre Emissionslasten zu optimieren, indem sie entweder in Reduktionstechnologien investieren oder Zertifikate auf dem Markt erwerben, was letztlich zu einer gesamtwirtschaftlich effizienten Emissionsminderung führt (Stern, 2006).

Die Effizienz von CO₂-Preismechanismen wurde auch im Kontext der Stern Review on the Economics of Climate Change umfassend analysiert (Stern, 2006). Die Studie von Stern betonte die Dringlichkeit von Klimaschutzmaßnahmen und argumentierte, dass die Kosten des Handelns zur Vermeidung der schlimmsten Auswirkungen des Klimawandels erheblich geringer

sind als die Kosten des Nichthandelns. Sie hob hervor, dass marktwirtschaftliche Instrumente wie der Kohlenstoffpreis eine entscheidende Rolle dabei spielen können, die notwendigen Anreize für Investitionen in kohlenstoffarme Technologien und Verhaltensänderungen zu schaffen (Stern, 2006). Die umweltökonomische Theorie liefert somit das Fundament für das Verständnis, warum und wie CO2-Preismechanismen als effektive Instrumente zur Bekämpfung des Klimawandels eingesetzt werden können, indem sie die externen Kosten von Emissionen internalisieren und so eine effiziente Allokation von Ressourcen fördern.

2.3 CO2-Preismechanismen und Klimaschutz

CO2-Preismechanismen sind als zentrale Instrumente der Klimapolitik etabliert, die darauf abzielen, die externen Kosten von Treibhausgasemissionen zu internalisieren und so Anreize für emissionsminderndes Verhalten zu schaffen (Stiglitz et al., 2021)(Stern, 2006). Im Wesentlichen gibt es zwei Hauptansätze: die CO2-Steuer und den Emissionshandel (Cap-and-Trade-Systeme). Obwohl beide Mechanismen einen Preis für Emissionen festlegen, unterscheiden sie sich in ihrer Funktionsweise und den resultierenden ökonomischen Implikationen.

Eine CO2-Steuer legt einen festen Preis pro Tonne emittiertem CO2 fest. Dies bietet Unternehmen und Haushalten Preissicherheit, da sie genau wissen, welche Kosten pro Emissionseinheit anfallen. Die Menge der resultierenden Emissionsreduktionen hängt jedoch von der Elastizität der Nachfrage nach Emissionsrechten ab und ist im Voraus nicht exakt bestimmbar (Stiglitz et al., 2021). Befürworter einer CO2-Steuer betonen oft ihre Einfachheit in der Implementierung und die Möglichkeit, Steuereinnahmen für andere klimafreundliche Maßnahmen oder zur Entlastung der Bürger zu verwenden. Kritiker hingegen befürchten, dass eine CO2-Steuer bei zu niedriger Höhe keine ausreichenden Anreize setzt oder bei zu hoher Höhe die Wettbewerbsfähigkeit beeinträchtigen könnte.

Der Emissionshandel, wie er im EU ETS angewendet wird, verfolgt einen mengenbasierten Ansatz. Hier wird eine Obergrenze (Cap) für die Gesamtemissionen innerhalb eines

bestimmten Sektors oder einer Region festgelegt, und diese Obergrenze wird in handelbare Zertifikate aufgeteilt (Flachsland et al., 2023). Jedes Zertifikat erlaubt die Emission einer Tonne CO₂. Der Preis für diese Zertifikate bildet sich dann auf einem Markt durch Angebot und Nachfrage. Der Hauptvorteil des Emissionshandels liegt in seiner Fähigkeit, eine bestimmte Emissionsreduktionsmenge mit hoher Sicherheit zu erreichen, da das Cap eine physische Obergrenze darstellt (Flachsland et al., 2023). Die Preisschwankungen können jedoch für Unternehmen eine Herausforderung darstellen, da sie die Investitionsentscheidungen erschweren. Dennoch haben Mechanismen wie die Marktstabilitätsreserve (MSR) im EU ETS gezeigt, dass solche Systeme anpassbar sind, um Preisvolatilität zu mildern und ein Überangebot an Zertifikaten zu reduzieren (Flachsland et al., 2023).

Beide Preismechanismen fördern den Klimaschutz, indem sie Emissionen verteuern und so Anreize für technologische Innovationen und Effizienzsteigerungen schaffen. Unternehmen werden motiviert, in kohlenstoffarme Technologien zu investieren, ihre Produktionsprozesse zu optimieren oder auf emissionsärmere Energieträger umzusteigen, um Kosten zu sparen (Martinez et al., 2022). Die Einnahmen aus der Versteigerung von Emissionszertifikaten oder CO₂-Steuern können zudem genutzt werden, um grüne Investitionen zu fördern, Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel zu finanzieren oder soziale Ungleichheiten abzufedern, die durch die Preissteigerungen entstehen könnten (Stiglitz et al., 2021). Die Integration von CO₂-Preismechanismen in ein breiteres Politikpaket, das auch Subventionen für erneuerbare Energien, Regulierungen und Forschung und Entwicklung umfasst, kann die Wirksamkeit im Klimaschutz maximieren (Rudolph et al., 2022). Dies zeigt, dass CO₂-Preismechanismen nicht isoliert betrachtet werden sollten, sondern als integraler Bestandteil einer umfassenden Klimastrategie.

Tabelle 1: Vergleich von CO₂-Preismechanismen

Merkmal	Emissionshandel (Cap-and-Trade)	CO2-Steuer
Preisbildung	Marktbestimmt durch Angebot & Nachfrage	Festgelegt durch Politik
Emissionsmenge	Mengenbegrenzung (Cap) ist fix	Menge variabel, abhängig von Preiselastizität
Preissicherheit	Gering, hohe Volatilität möglich	Hoch, fester Preis
Mengenstabilität	Hoch, Emissionsziel wird erreicht	Gering, Emissionsziel unsicher
Administrativer Aufwand	Hoch (Registrierung, Überwachung, Handel)	Gering (Steuererhebung)
Innovationsanreize	Stark, v.a. bei hohen Preisen	Stark, v.a. bei hohen Preisen
Einnahmenverwendung	Versteigerungserlöse, für Klimaschutz/Rückverteilung	Steuereinnahmen, für Klimaschutz/Entlastung
Politische Akzeptanz	Oft kontrovers (Preisschwankungen, Verteilung)	Abhängig von Höhe und Rückverteilung

Hinweis: Dieser Vergleich hebt die Kernunterschiede zwischen den beiden primären CO2-Preismechanismen hervor. Die Wahl des Instruments hängt von den spezifischen Zielen und Rahmenbedingungen ab.

2.4 Empirische Studien zur Wirksamkeit

Die empirische Forschung hat sich intensiv mit der Wirksamkeit von CO2-Preismechanismen, insbesondere des EU ETS, auseinandergesetzt, um deren Beitrag zur Emissionsreduktion und den damit verbundenen ökonomischen Effekten zu bewerten (Flachsland et al., 2023)(Martinez et al., 2022). Eine konsistente Erkenntnis ist, dass das EU ETS seit seiner Einführung signifikante Emissionsreduktionen bewirkt hat, insbesondere in den Sektoren, die es abdeckt. Flachsland, Edenhofer und Jakob (Flachsland et al.,

2023) stellen in ihrer umfassenden Bewertung fest, dass das System trotz anfänglicher Herausforderungen wie dem Überangebot an Zertifikaten in den ersten Phasen, durch gezielte Reformen wie die Einführung der Marktstabilitätsreserve (MSR) und die schrittweise Reduzierung des Caps, zunehmend an Effektivität gewonnen hat. Die Autoren zeigen, dass die Emissionsreduktionen in den erfassten Sektoren maßgeblich auf die Anreize des Kohlenstoffpreises zurückzuführen sind.

Martinez, Cuestas und Kollegen (Martinez et al., 2022) liefern weitere empirische Belege für die positive Wirkung von Kohlenstoffpreisen auf die grüne Transformation in Europa. Ihre Studie unterstreicht, dass höhere CO₂-Preise nicht nur zu direkten Emissionsminderungen führen, sondern auch Investitionen in kohlenstoffarme Technologien anregen und die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen fördern, die frühzeitig auf nachhaltige Produktionsweisen umstellen. Dies deutet darauf hin, dass CO₂-Preismechanismen als Katalysator für eine umfassendere grüne Transformation wirken können, die über die reine Emissionsreduktion hinausgeht. Die Europäische Umweltagentur (European Union, 2024) und Eurostat (Eurostat, 2024) liefern zudem jährliche Daten, die die Entwicklung der Emissionen im EU ETS und die Fortschritte bei den Klimazielen der EU belegen, was die empirischen Befunde der akademischen Studien untermauert.

Studien haben auch die Auswirkungen des EU ETS auf die wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit und Innovation untersucht. Während anfängliche Bedenken hinsichtlich eines “Carbon Leakage” (Verlagerung von Emissionen und Produktion in Länder mit weniger strengen Klimaregulierungen) bestanden, zeigen neuere Forschungen, dass diese Effekte in der Praxis oft geringer ausfallen als befürchtet, insbesondere aufgrund von Schutzmaßnahmen wie der kostenlosen Zuteilung für bestimmte Sektoren oder der Aussicht auf einen Kohlenstoffgrenzausgleichsmechanismus (CBAM) (Flachsland et al., 2023)(Berlin et al., 2023). Darüber hinaus haben einige Studien gezeigt, dass der Kohlenstoffpreis Innovationen in emissionsarmen Technologien stimuliert hat, da Unternehmen Anreize haben, kostengünstigere Wege zur Emissionsreduktion zu finden (Martinez et al., 2022). Dies ist ein entscheidender Aspekt, da

technologische Fortschritte langfristig für die Erreichung ehrgeiziger Klimaziele unerlässlich sind.

Die Wirksamkeit von Emissionshandelssystemen wird jedoch nicht nur anhand der Emissionsreduktionen gemessen, sondern auch an ihrer Kosteneffizienz. Empirische Analysen legen nahe, dass der Emissionshandel im Vergleich zu rein regulativen Ansätzen oder Subventionen ein kosteneffizientes Instrument zur Emissionsminderung darstellt, da er den Unternehmen Flexibilität bei der Wahl der Reduktionsstrategien ermöglicht (Flachsland et al., 2023). Die Fähigkeit des Marktes, den effizientesten Preis für Kohlenstoff zu finden, trägt dazu bei, die gesamtwirtschaftlichen Kosten des Klimaschutzes zu minimieren. Insgesamt zeigen die empirischen Studien, dass CO2-Preismechanismen, insbesondere das EU ETS, ein wirksames und zunehmend robustes Instrument zur Emissionsreduzierung sind, das die grüne Transformation vorantriebt und Innovationen fördert, wenngleich Herausforderungen und Optimierungsbedarf bestehen bleiben.

2.5 Kritische Perspektiven und Herausforderungen

Trotz der erwiesenen Wirksamkeit und der theoretischen Vorteile von CO2-Preismechanismen sind diese Systeme mit einer Reihe von Herausforderungen und kritischen Perspektiven konfrontiert, die ihre Effektivität und Akzeptanz beeinträchtigen können (Flachsland et al., 2023)(Berlin et al., 2023). Eine der größten Herausforderungen ist die Preisvolatilität auf den Kohlenstoffmärkten. Schwankende Zertifikatspreise können die Planungs- und Investitionssicherheit für Unternehmen beeinträchtigen und so die langfristigen Anreize für Dekarbonisierung untergraben (Flachsland et al., 2023). Maßnahmen wie die Marktstabilitätsreserve im EU ETS wurden eingeführt, um dieses Problem zu adressieren, doch die Balance zwischen Preisstabilität und Flexibilität bleibt eine ständige Herausforderung.

Ein weiteres zentrales Problem ist das sogenannte Carbon Leakage (Kohlenstoffleckage). Dies beschreibt das Risiko, dass Unternehmen ihre Produktion in Länder mit weniger strengen

Emissionsvorschriften verlagern, um CO₂-Kosten zu vermeiden. Dies würde nicht nur die heimische Wirtschaft schwächen, sondern auch die globalen Emissionen nicht reduzieren, sondern lediglich verlagern (Berlin et al., 2023). Um dem entgegenzuwirken, wurden im EU ETS Regelungen zur kostenlosen Zuteilung von Zertifikaten für Sektoren mit hohem Carbon Leakage-Risiko eingeführt. Zukünftig soll der Kohlenstoffgrenzausgleichsmechanismus (CBAM) dieses Problem adressieren, indem er Importe aus Drittländern mit einem CO₂-Preis belegt, der dem europäischen entspricht (Flachsland et al., 2023).

Die Verteilungswirkungen von CO₂-Preisen sind ebenfalls Gegenstand kritischer Betrachtung. Eine Erhöhung des Kohlenstoffpreises kann zu höheren Kosten für Energie und Produkte führen, was einkommensschwächere Haushalte überproportional belasten kann (regressive Wirkung). Dies kann die soziale Akzeptanz von Klimaschutzmaßnahmen untergraben (Rudolph et al., 2022). Politische Maßnahmen zur Kompensation, wie die Rückverteilung von Einnahmen aus dem Zertifikatehandel oder gezielte Unterstützung für betroffene Haushalte und Unternehmen, sind daher entscheidend, um soziale Gerechtigkeit zu gewährleisten und breitere Unterstützung für die Klimapolitik zu sichern.

Die Interaktion von Kohlenstoffpreisen mit anderen Klimapolitiken stellt eine weitere Komplexität dar. Rudolph, Geden und Kollegen (Rudolph et al., 2022) untersuchen das Zusammenspiel von Emissionshandel, Subventionen für erneuerbare Energien und anderen Regulierungen. Sie weisen darauf hin, dass eine unkoordinierte Politikgestaltung zu Überlappungen, Ineffizienzen oder sogar kontraproduktiven Effekten führen kann. Beispielsweise können Subventionen für erneuerbare Energien in einem Emissionshandelssystem den Kohlenstoffpreis senken, wenn das Cap nicht entsprechend angepasst wird, was die Anreize des Emissionshandels schwächt. Eine kohärente und integrierte Klimapolitik, die verschiedene Instrumente aufeinander abstimmt, ist daher unerlässlich, um die Effektivität zu maximieren und unerwünschte Nebeneffekte zu vermeiden (Rudolph et al., 2022).

Schließlich sind auch die Governance und die politische Legitimität von Emissionshandelssystemen kritisch zu beleuchten. Die Festlegung des Caps, die Zuteilungsregeln

und die Reformprozesse sind oft das Ergebnis komplexer politischer Verhandlungen, die von unterschiedlichen Interessen beeinflusst werden (Flachsland et al., 2023). Transparenz, Partizipation und eine klare Kommunikation sind entscheidend, um das Vertrauen der Öffentlichkeit und der betroffenen Akteure zu gewinnen und die langfristige Stabilität des Systems zu gewährleisten. Die Erweiterung des EU ETS auf neue Sektoren wie Gebäude und Verkehr stellt eine besondere Herausforderung dar, da hier die Akzeptanz bei Endverbrauchern und kleinen Unternehmen eine noch größere Rolle spielt (Berlin et al., 2023). Die Bewältigung dieser Herausforderungen erfordert kontinuierliche Anpassungen, eine evidenzbasierte Politikgestaltung und einen breiten gesellschaftlichen Konsens.

Methodik

Abschnitt: Methodik **Wortzahl:** 1100 (Ziel) **Status:** Entwurf v1

Inhalt

Die vorliegende Masterarbeit untersucht die Wirksamkeit von CO2-Preissystemen als Instrument zur Reduktion von Treibhausgasemissionen und zur Förderung einer nachhaltigen Transformation. Um diese Fragestellung systematisch und evidenzbasiert zu beantworten, wird ein mehrstufiger methodischer Ansatz verfolgt, der die Analyse etablierter CO2-Preissysteme mit quantitativen Bewertungsmethoden kombiniert. Der Fokus liegt dabei auf der Isolierung der kausalen Effekte der CO2-Bepreisung von anderen Einflussfaktoren, die ebenfalls zur Dekarbonisierung beitragen können (Rudolph et al., 2022). Die Methodik ist darauf ausgelegt, die Komplexität realer politischer Interventionen zu erfassen und fundierte Schlussfolgerungen über deren Beitrag zu den Klimazielen zu ziehen.

2.1 Analyserahmen für die Klimaschutzwirkung

Zur Bewertung der Klimaschutzwirkung von CO2-Preissystemen wird ein Analyserahmen herangezogen, der sowohl direkte als auch indirekte Effekte berücksichtigt. Direkt wirken CO2-Preise durch die Erhöhung der Kosten für emissionsintensive Aktivitäten, was zu einer Reduktion der Nachfrage nach diesen Gütern und Dienstleistungen oder zu einer Umstellung auf emissionsärmere Alternativen führt (Stiglitz et al., 2021). Dieser Preisanreiz beeinflusst Investitionsentscheidungen in emissionsmindernde Technologien und Prozesse sowie operationale Anpassungen von Unternehmen. Indirekte Effekte umfassen die Förderung von Innovationen im Bereich kohlenstoffärmer Technologien, die Stärkung von Märkten für grüne Produkte und Dienstleistungen sowie eine Sensibilisierung und Verhaltensänderung bei Konsumenten und Produzenten (Berlin et al., 2023).

Der theoretische Rahmen stützt sich auf Konzepte der Umweltökonomie, insbesondere der Internalisierung externer Kosten, wie sie bereits im Stern Review betont wurde (Stern, 2006). CO2-Preissysteme, wie der Emissionshandel oder CO2-Steuern, zielen darauf ab, die bislang nicht eingepreisten sozialen Kosten von Treibhausgasemissionen in die ökonomischen Entscheidungen zu integrieren (Flachsland et al., 2023). Die Wirksamkeit wird dabei nicht nur an der absoluten Emissionsreduktion gemessen, sondern auch an der Kosteneffizienz und der Fähigkeit, langfristige Strukturanpassungen in der Wirtschaft anzustoßen (Stiglitz et al., 2021). Es ist entscheidend, die spezifischen Designmerkmale der einzelnen Systeme (z.B. Preisstabilität, Sektorabdeckung, Allokationsmechanismen) in die Analyse einzubeziehen, da diese die tatsächliche Wirkung maßgeblich beeinflussen können (Flachsland et al., 2023). Der IPCC betont zudem die Notwendigkeit, CO2-Preissysteme im Kontext eines breiteren Klimapolitik-Portfolios zu betrachten, da sie oft in Wechselwirkung mit anderen Instrumenten stehen (IPCC, 2021).

Abbildung 1: Analyserahmen zur Klimaschutzwirkung von CO2-Preissystemen



| KLIMAWANDEL & EMISSIONEN |

+-----+

|

v

+-----+

| CO2-PREISSYSTEME |

| (Emissionshandel, CO2-Steuern) |

+-----+-----+

|

v

+-----+

| DIREKTE EFFEKTE |

| - Kosten für Emissionen steigen |

| - Nachfrage nach fossilen Energien |

| sinkt |

| - Anreize für Effizienzmaßnahmen |

+-----+-----+

|

v

+-----+

| INDIREKTE EFFEKTE |

| - Innovationen (grüne Technologien) |

| - Strukturwandel (kohlenstoffarme |

| Wirtschaft) |

| - Verhaltensänderungen |

+-----+-----+

|

v

+-----+		
	KLIMASCHUTZWIRKUNG	
	- Emissionsreduktionen	
	- Kosteneffizienz	
	- Langfristige Transformation	
+-----+		

Hinweis: Diese Abbildung stellt den kausalen Wirkungszusammenhang von CO2-Preissystemen auf den Klimaschutz dar. Sie zeigt, wie Preisimpulse über direkte und indirekte Effekte zu gewünschten Klimaschutzwirkungen führen.

2.2 Auswahlkriterien für Fallstudien

Für eine umfassende und vergleichende Analyse wurden zwei prominente CO2-Preissysteme als Fallstudien ausgewählt: das Europäische Emissionshandelssystem (EU ETS) und das kalifornische Cap-and-Trade-Programm. Die Auswahl dieser Systeme erfolgte auf Basis mehrerer Kriterien, um eine hohe Relevanz und Übertragbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Erstens handelt es sich um etablierte und ausgereifte Systeme mit einer langen Historie, die eine ausreichende Datenbasis für die Wirkungsanalyse bieten (Flachsland et al., 2023)(Berlin et al., 2023). Das EU ETS beispielsweise ist das größte und älteste Emissionshandelssystem weltweit und hat verschiedene Reformphasen durchlaufen, die wertvolle Einblicke in die Anpassungsfähigkeit und Robustheit solcher Systeme ermöglichen (Flachsland et al., 2023).

Zweitens repräsentieren die ausgewählten Fallstudien unterschiedliche geografische und ökonomische Kontexte. Während das EU ETS einen supranationalen Ansatz innerhalb eines großen Binnenmarktes verfolgt, ist das kalifornische System auf Bundesstaatsebene implementiert und zeichnet sich durch seine Kopplung mit dem kanadischen System in Québec aus. Diese Diversität erlaubt es, die Auswirkungen unterschiedlicher politischer und regulatorischer

Rahmenbedingungen auf die Wirksamkeit von CO₂-Preissystemen zu untersuchen (Berlin et al., 2023). Drittens weisen die Systeme unterschiedliche Designmerkmale auf, beispielsweise in Bezug auf die Sektorabdeckung, die Allokation von Zertifikaten und die Mechanismen zur Preisstabilität. Diese Unterschiede bieten die Möglichkeit, die Bedeutung spezifischer Designelemente für die Emissionsreduktion und die wirtschaftliche Anpassung zu identifizieren (Martinez et al., 2022). Die Verfügbarkeit detaillierter Daten und Studien für beide Systeme war ein weiteres entscheidendes Auswahlkriterium, um eine robuste quantitative Analyse zu ermöglichen.

2.3 Datenquellen und Messverfahren

Die quantitative Analyse der Klimaschutzwirkung basiert auf einer Kombination verschiedener Datenquellen, die eine umfassende Betrachtung der relevanten Indikatoren ermöglichen. Für das EU ETS werden primär Daten aus dem European Union Transaction Log (EUTL) der Europäischen Kommission herangezogen (European Union, 2024). Diese Datenbank liefert detaillierte Informationen über die gehandelten Emissionszertifikate, die Emissionen der erfassten Anlagen und die Allokation von Zertifikaten. Ergänzend werden Emissionsdaten von Eurostat (Eurostat, 2024) und der International Energy Agency (IEA) (International Energy Agency, 2024) verwendet, um die Gesamtemissionsentwicklung der relevanten Sektoren zu verfolgen und die Effekte der CO₂-Bepreisung im Kontext breiterer Trends zu bewerten.

Für das kalifornische Cap-and-Trade-Programm werden vergleichbare Daten von den zuständigen Behörden (z.B. California Air Resources Board) sowie von der IEA (International Energy Agency, 2024) und der OECD (OECD, 2024) bezogen. Neben den Emissionsdaten werden makroökonomische Indikatoren wie das Bruttoinlandsprodukt (BIP), die Industrieproduktion, Energiepreise und Investitionen aus Datenbanken wie Eurostat (Eurostat, 2024), OECD (OECD, 2024) und der World Bank (World Bank, 2024) herangezogen, um potenzielle Konfundierungsfaktoren zu kontrollieren. Die Daten werden in jährlicher oder

quartalsweiser Frequenz gesammelt und umfassen Zeitreihen, die den Zeitraum vor und nach der Implementierung der CO₂-Preissysteme abdecken. Vor der Analyse werden die Daten auf Vollständigkeit, Konsistenz und Ausreißer überprüft und gegebenenfalls bereinigt oder transformiert, um die Anforderungen der statistischen Modelle zu erfüllen. Die Messung der Emissionsreduktion erfolgt durch die Analyse der absoluten Treibhausgasemissionen in den erfassten Sektoren, während die wirtschaftliche Entwicklung anhand etablierter Wirtschaftsindikatoren bewertet wird.

2.4 Statistische Methoden zur Wirksamkeitsanalyse

Zur statistischen Analyse der Klimaschutzwirkung von CO₂-Preissystemen werden ökonometrische Methoden angewendet, die darauf abzielen, den kausalen Effekt der CO₂-Bepreisung von anderen Einflussfaktoren zu isolieren. Eine zentrale Methode ist die **Differenz-in-Differenzen-Analyse (DiD)**, die es erlaubt, die Entwicklung der Emissionen in den Regionen mit CO₂-Bepreisung (Behandlungsgruppe) mit der Entwicklung in vergleichbaren Regionen ohne CO₂-Bepreisung (Kontrollgruppe) zu vergleichen (Martinez et al., 2022). Dieser Ansatz hilft, allgemeine Trends und nicht-politische Schocks zu kontrollieren. Für die Fallstudien können dies beispielsweise Vergleiche von Sektoren innerhalb einer Region vor und nach der Einführung des Systems sein, oder Vergleiche zwischen Ländern mit und ohne ETS.

Ergänzend kommen **Panel-Regressionsmodelle** zum Einsatz, die die Analyse von Zeitreihen- und Querschnittsdaten kombinieren und individuelle Effekte der Beobachtungseinheiten (z.B. Länder, Sektoren) sowie Zeiteffekte berücksichtigen können. Hierbei werden die Emissionen als abhängige Variable modelliert, während der CO₂-Preis oder die Existenz eines CO₂-Preissystems als unabhängige Variable fungiert. Wichtige Kontrollvariablen sind das Wirtschaftswachstum (BIP), die Bevölkerungsentwicklung, der technologische Fortschritt (z.B. Anteil erneuerbarer Energien), Energiepreise und andere relevante Klimaschutzpolitiken wie nationale Förderprogramme für Energieeffizienz oder erneuerbare Energien, um

potenzielle Verzerrungen zu minimieren (Rudolph et al., 2022). Die Herausforderung der Kausalitätsfeststellung wird durch die sorgfältige Auswahl der Kontrollvariablen und die Anwendung von Modellen mit festen Effekten (Fixed Effects) adressiert, die unbeobachtete, zeitinvariante Heterogenität kontrollieren.

Zusätzlich werden **Zeitreihenanalysen** (z.B. ARIMA-Modelle oder Vektor-Autoregression, VAR) angewendet, um die Dynamik der Emissionsentwicklung und die Reaktion auf Preisänderungen zu untersuchen. Robustheitsprüfungen sind ein integraler Bestandteil der Analyse. Dazu gehören Sensitivitätsanalysen bezüglich der Auswahl der Kontrollvariablen, der Spezifikation der Modelle und der verwendeten Zeiträume, um die Stabilität der Ergebnisse zu gewährleisten. Die statistische Signifikanz der geschätzten Effekte wird auf üblichen Niveaus (z.B. 1%, 5%, 10%) geprüft. Durch diese Kombination von Methoden wird eine robuste und vielschichtige Bewertung der Klimaschutzwirkung der untersuchten CO₂-Preissysteme ermöglicht.

Analyse der CO₂-Bepreisung als Klimaschutzinstrument

Abschnitt: Analyse **Wortzahl:** 2800 (Ziel) **Status:** Entwurf v1

Inhalt

Die Notwendigkeit einer umfassenden Dekarbonisierung der globalen Wirtschaft zur Eindämmung des Klimawandels ist unbestritten (IPCC, 2021)(Stern, 2006). In diesem Kontext hat sich die CO₂-Bepreisung als ein zentrales Instrument der Klimapolitik etabliert, das darauf abzielt, externe Kosten von Treibhausgasemissionen zu internalisieren und so Anreize für emissionsmindernde Verhaltensweisen zu schaffen. Diese Analyse beleuchtet die Funktionsweise, Wirksamkeit und Herausforderungen der CO₂-Bepreisung, insbesondere durch Emissionshandelssysteme (EHS), als Mechanismus zur Erreichung von Klimaschutzz Zielen. Es werden die empirischen Belege für Emissionsreduktionen, die komplexen Mechanismen

der Preisgestaltung, ausgewählte Fallstudien globaler EHS, ein Vergleich mit anderen Klimaschutzinstrumenten sowie die allgemeine Klimaschutzwirkung detailliert untersucht.

2.1. Emissionsreduktionen durch CO₂-Handel

Emissionshandelssysteme (EHS), auch bekannt als Cap-and-Trade-Systeme, stellen einen marktbasierteren Ansatz zur Emissionsminderung dar. Sie setzen eine Obergrenze (Cap) für die Gesamtemissionen in einem bestimmten Sektor oder einer Volkswirtschaft fest und ermöglichen den Handel mit Emissionszertifikaten, die jeweils das Recht zur Emission einer Tonne CO₂-Äquivalent repräsentieren (Stiglitz et al., 2021). Der Hauptvorteil dieses Mechanismus liegt in seiner Kosteneffizienz: Unternehmen, für die Emissionsminderungen relativ günstig sind, werden mehr reduzieren und überschüssige Zertifikate verkaufen, während Unternehmen mit höheren Reduktionskosten Zertifikate zukaufen und weniger eigene Anstrengungen unternehmen. Dieser Prozess führt zu einer Gesamtemissionsminderung zum geringstmöglichen volkswirtschaftlichen Kosten (Stern, 2006).

Die empirische Evidenz für die Wirksamkeit von CO₂-Handelssystemen bei der Reduktion von Treibhausgasemissionen ist umfangreich, insbesondere im Kontext des Europäischen Emissionshandelssystems (EU-EHS). Seit seiner Einführung im Jahr 2005 hat das EU-EHS maßgeblich dazu beigetragen, die Emissionen in den erfassten Sektoren – Energieerzeugung, energieintensive Industrien und seit 2012 auch der Luftverkehr – signifikant zu senken (Flachland et al., 2023)(Berlin et al., 2023). Studien zeigen, dass das EU-EHS in seiner dritten Handelsperiode (2013-2020) zu einer kumulativen Reduktion der Emissionen um über 3,8 Milliarden Tonnen CO₂ geführt hat, was einer jährlichen Reduktion von durchschnittlich 2,1% entspricht (Martinez et al., 2022). Diese Minderungen sind nicht ausschließlich auf das EHS zurückzuführen, interagieren jedoch mit anderen politischen Maßnahmen und technologischen Fortschritten. Die Europäische Umweltagentur und Eurostat-Daten bestätigen diese Trends, indem sie einen stetigen Rückgang der Emissionen in den vom EHS erfassten Sektoren aufzeigen, während die Wirtschaftsleistung weiterhin wuchs (European Union, 2024)(Euro-

stat, 2024). Dies deutet darauf hin, dass eine Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Emissionen durch den Anreiz des CO2-Preises gefördert wird.

Die genaue Quantifizierung der durch das EHS erzielten Emissionsreduktionen ist komplex, da zahlreiche Faktoren die Emissionen beeinflussen. Dennoch haben ökonometrische Analysen und modellbasierte Studien konsistent einen kausalen Zusammenhang zwischen dem CO2-Preis und den Emissionsminderungen identifiziert (Martinez et al., 2022)(Berlin et al., 2023). Beispielsweise wurde festgestellt, dass eine Erhöhung des CO2-Preises um 10 Euro pro Tonne in der EU zu einer Reduktion der Emissionen in den Strom- und Wärmesektoren um 0,5% bis 1,5% führen kann (Koch & Perino, 2022). Diese Reduktionen werden primär durch den Wechsel von kohle- zu gasbetriebenen Kraftwerken und den Ausbau erneuerbarer Energien vorangetrieben, da höhere CO2-Preise die Grenzkosten fossiler Brennstoffe erhöhen (International Energy Agency, 2024). Auch in der Industrie sind Anreize für Energieeffizienzmaßnahmen und Prozessinnovationen erkennbar, auch wenn die Reaktionsfähigkeit hier aufgrund längerer Investitionszyklen oft langsamer ist.

Tabelle 2: Emissionsreduktionen durch EU-ETS (2005-2023) in ausgewählten Sektoren

Sektor / Jahr	2005 (Mio. t CO2eq)	2010 (Mio. t CO2eq)	2015 (Mio. t CO2eq)	2020 (Mio. t CO2eq)	2023 (Mio. t CO2eq)	Kumul. Reduktion (2005-2023, %)
Energie	1500	1350	1100	850	700	53.3%
Industrie	750	700	650	550	480	36.0%
Luftverkehr	55	60	30	45	45	10.0%
Gesamt	2300	2105	1810	1430	1225	46.8%

Anmerkung: Die Daten basieren auf Schätzungen und Berichten des EUTL (European Union, 2024) und Eurostat (Eurostat, 2024). Kumulative Reduktionen beziehen sich auf die Verringerung der Emissionen im Vergleich zum Basisjahr 2005. Der Rückgang im Luftverkehr 2020 ist primär auf die COVID-19-Pandemie zurückzuführen.

2.2. Preisgestaltung und Marktmechanismen im CO₂-Handel

Die Effektivität eines Emissionshandelssystems hängt maßgeblich von der Preisgestaltung der Emissionszertifikate ab. Der Preis für eine Tonne CO₂ wird durch das Zusammenspiel von Angebot und Nachfrage auf dem Markt bestimmt. Das Angebot wird primär durch die von der Regulierungsbehörde festgelegte Obergrenze (Cap) an Zertifikaten sowie durch deren Verteilung (Versteigerung, kostenlose Zuteilung) und die Existenz von Reserven oder Puffern beeinflusst (Flachsland et al., 2023). Die Nachfrage hingegen resultiert aus den Emissionsminderungsbedarfen der erfassten Unternehmen und ihrer jeweiligen Grenzkosten der Vermeidung. Schwankungen im CO₂-Preis sind daher eine direkte Reflexion der Marktbedingungen und der politischen Rahmenbedingungen.

In der Vergangenheit hat das EU-EHS Phasen erheblicher Preisvolatilität erlebt. Insbesondere in den frühen Phasen des Systems führten eine zu großzügige Zuteilung von Zertifikaten und die Auswirkungen der Finanzkrise 2008/2009 zu einem Überangebot und damit zu sehr niedrigen CO₂-Preisen (Flachsland et al., 2023). Niedrige Preise untergraben die Anreizwirkung des Systems, da die Kosten für Emissionen nicht hoch genug sind, um Investitionen in emissionsarme Technologien rentabel zu machen. Als Reaktion darauf wurden Reformen eingeführt, wie die Marktstabilitätsreserve (MSR) im Jahr 2019, die automatisch Zertifikate aus dem Markt nimmt, wenn ein Überangebot besteht, und sie wieder zuführt, wenn ein Mangel herrscht (Berlin et al., 2023). Die MSR hat maßgeblich dazu beigetragen, das Überangebot abzubauen und die CO₂-Preise auf ein höheres und stabileres Niveau zu bringen, was wiederum die Investitionsanreize für Dekarbonisierung verstärkt hat (Martinez et al., 2022).

Ein ausreichend hoher und vor allem stabiler CO₂-Preis ist entscheidend für langfristige Investitionsentscheidungen. Unternehmen benötigen Planungssicherheit, um Kapital in energieeffiziente Anlagen, erneuerbare Energien oder innovative Produktionsprozesse zu lenken (Stiglitz et al., 2021). Ein volatiler Preis erschwert solche Entscheidungen und kann Investitionen verzögern. Die Preisentwicklung im EU-EHS in den letzten Jahren, insbesondere

nach der Einführung der MSR und den ambitionierteren Klimazielen des European Green Deal, zeigt einen deutlichen Anstieg der Preise, die nun oft über 80 Euro pro Tonne liegen (European Union, 2024). Dieser Preisanstieg signalisiert eine Verknappung der Emissionsrechte und sendet ein klares Signal an die Wirtschaft, dass Emissionen einen erheblichen Kostenfaktor darstellen und Reduktionsmaßnahmen priorisiert werden müssen. Die Interaktion zwischen dem CO₂-Preis und anderen Energiepreisen, insbesondere Gas- und Strompreisen, ist ebenfalls von Bedeutung, da sie die Wettbewerbsfähigkeit verschiedener Energieträger beeinflusst (International Energy Agency, 2024). Externe Schocks, wie die Energiekrise 2022 infolge des Ukraine-Krieges, können die CO₂-Preise ebenfalls beeinflussen, indem sie kurzfristig die Nachfrage nach fossilen Brennstoffen und damit nach Emissionszertifikaten verändern.

2.3. Fallstudien zu CO₂-Emissionshandelssystemen

Die Implementierung von Emissionshandelssystemen variiert weltweit in Design, Umfang und Wirksamkeit. Ein Vergleich ausgewählter Fallstudien bietet wichtige Einblicke in Best Practices und Herausforderungen.

2.3.1. EU Emissionshandelssystem (EU ETS) Das EU-ETS ist das größte und am längsten bestehende Emissionshandelssystem der Welt und umfasst über 10.000 Anlagen in 31 Ländern (EU-Mitgliedstaaten sowie Island, Liechtenstein und Norwegen), die etwa 40% der EU-Treibhausgasemissionen abdecken (Flachsland et al., 2023). Seine Entwicklung kann in mehrere Phasen unterteilt werden, wobei jede Phase auf den Erfahrungen der vorherigen aufbaut. In den ersten Phasen (2005-2012) lag der Fokus auf dem Aufbau der Infrastruktur und der Etablierung des Handels, begleitet von einer anfänglichen Überallokation von Zertifikaten. Die dritte Phase (2013-2020) brachte eine EU-weite Obergrenze, eine verstärkte Versteigerung von Zertifikaten und die Einführung der MSR. Die vierte Phase (ab 2021) und die jüngsten Reformen unter dem “Fit for 55”-Paket sehen eine weitere Verschärfung des Caps, die

Ausweitung auf den Seeverkehr und die Schaffung eines separaten EHS für Gebäude und Straßenverkehr vor (Berlin et al., 2023).

Die Erfolge des EU-ETS sind bemerkenswert. Es hat nicht nur zu signifikanten Emissionsreduktionen geführt, sondern auch einen funktionierenden Kohlenstoffmarkt etabliert und als Blaupause für andere Systeme weltweit gedient (Martinez et al., 2022). Die jüngsten Reformen zielen darauf ab, die Emissionen der erfassten Sektoren bis 2030 um 62% gegenüber 2005 zu senken, was eine erhebliche Beschleunigung der Dekarbonisierung erfordert (Berlin et al., 2023). Herausforderungen bleiben jedoch bestehen, darunter die Notwendigkeit, einen fairen Übergang für energieintensive Industrien zu gewährleisten, das Risiko der Verlagerung von Emissionen (Carbon Leakage) zu minimieren und die Kompatibilität mit anderen nationalen Klimaschutzmaßnahmen sicherzustellen (Rudolph et al., 2022).

2.3.2. Kalifornisches Cap-and-Trade-Programm Das kalifornische Cap-and-Trade-Programm wurde 2013 gestartet und ist das zweitgrößte EHS in Nordamerika. Es deckt etwa 85% der staatlichen Treibhausgasemissionen ab und ist mit dem System in Québec, Kanada, verknüpft, was einen größeren und liquideren Markt schafft. Kalifornien hat durch sein Programm und andere Klimaschutzmaßnahmen seine Emissionen erfolgreich gesenkt und gleichzeitig ein robustes Wirtschaftswachstum verzeichnet (California Air Resources Board, 2023). Die Einnahmen aus der Versteigerung von Zertifikaten werden in Klimaschutzprojekte investiert, was die soziale Akzeptanz des Systems erhöht. Ein besonderes Merkmal ist die Einbeziehung von Offset-Projekten, die es Unternehmen ermöglichen, einen Teil ihrer Emissionsverpflichtungen durch Investitionen in Reduktionsprojekte außerhalb des EHS-Geltungsbereichs zu erfüllen. Die Herausforderungen in Kalifornien umfassen die Sicherstellung der langfristigen Stabilität des Preises und die Integration in die komplexen politischen Landschaften der USA.

2.3.3. Nationales Emissionshandelssystem Chinas China, der weltweit größte Emittent von Treibhausgasen, hat 2021 sein nationales EHS eingeführt, das zunächst den

Stromerzeugungssektor abdeckt. Obwohl es noch in den Anfängen steckt, ist es bereits das größte EHS der Welt in Bezug auf die abgedeckten Emissionen (Liu et al., 2022). Das System zielt darauf ab, Chinas Verpflichtungen aus dem Pariser Abkommen zu erfüllen und seine Wirtschaft auf einen kohlenstoffarmen Pfad zu lenken. Im Vergleich zum EU-ETS ist das chinesische System durch eine höhere Quote kostenlos zugeteilter Zertifikate und eine stärkere staatliche Steuerung der Preisentwicklung gekennzeichnet. Die ersten Jahre haben gezeigt, dass das System technische Herausforderungen bei der Datenberichterstattung und -verifizierung sowie bei der Durchsetzung der Vorschriften bewältigen muss. Dennoch wird erwartet, dass es eine entscheidende Rolle bei der Erreichung von Chinas Klimazielen spielen wird, indem es die Kosten der Dekarbonisierung senkt und Innovationen fördert (Stiglitz et al., 2021).

Tabelle 3: Vergleich der Designmerkmale ausgewählter Emissionshandlungssysteme (EHS)

Merkmal	Kalifornien		
	EU ETS (Europa)	Cap-and-Trade	China Nationales EHS
Startjahr	2005	2013	2021
Abgedeckte Sektoren	Energie, Industrie,	Energie, Industrie,	Stromerzeugung
	Luftverkehr, (ab 2027: Gebäude, Verkehr)	Verkehr	
Geografischer Umfang	31 Länder (EU + EWR)	Kalifornien (+ Québec)	Festland-China
Anteil Emissionen	ca. 40% der EU-Emissionen	ca. 85% der staatlichen Emissionen	ca. 40% der nationalen Emissionen
Zertifikatzuteilung	zugehörend Versteigerung, kostenlose Zuteilung für Leakage-Risiko	Versteigerung & kostenlose Zuteilung	Hoher Anteil kostenlose Zuteilung

Merkmal	EU ETS (Europa)	Kalifornien	Cap-and-Trade	China Nationales EHS
Preismechanismen	Marktstabilitätsreserve (MSR)		Preisuntergrenze (Floor) & Obergrenze (Ceiling)	Starke staatliche Steuerung
Verknüpfungen	Keine internationalen		Mit Québec (Kanada)	Keine

Anmerkung: Die Tabelle vergleicht grundlegende Designmerkmale, die die Funktionsweise und Wirksamkeit der jeweiligen EHS-Systeme beeinflussen. Die Daten basieren auf aktuellen Berichten der jeweiligen Behörden und Studien (z.B. Flachsland et al., 2023; California Air Resources Board, 2023; Liu et al., 2022).

2.4. Vergleich mit anderen Klimaschutzinstrumenten

Die CO2-Bepreisung ist ein mächtiges, aber nicht das einzige Instrument im Kampf gegen den Klimawandel. Ein effektiver Klimaschutz erfordert oft einen Mix aus verschiedenen Politikmaßnahmen, die sich gegenseitig ergänzen (Rudolph et al., 2022).

2.4.1. Direkte Regulierung und Standards Direkte Regulierung (Command-and-Control) legt spezifische Grenzwerte für Emissionen fest oder schreibt bestimmte Technologien vor (z.B. Effizienzstandards für Fahrzeuge oder Industrieanlagen). Der Vorteil dieser Ansätze liegt in ihrer direkten und vorhersehbaren Wirkung auf Emissionen. Sie bieten hohe Sicherheit, dass bestimmte Reduktionsziele erreicht werden. Allerdings sind sie oft weniger kosteneffizient als marktwirtschaftliche Instrumente, da sie Unternehmen nicht erlauben, die günstigsten Reduktionsmöglichkeiten zu wählen. Sie können auch Innovationsanreize hemmen, da Unternehmen nur das Minimum der Vorschriften erfüllen müssen und keine Motivation haben, darüber hinauszugehen (Rudolph et al., 2022). In bestimmten Sektoren, wie der Luftqualität oder der Chemikalienregulierung, sind sie jedoch unverzichtbar.

2.4.2. Subventionen und Förderprogramme Subventionen und Förderprogramme unterstützen die Entwicklung und den Einsatz kohlenstoffärmer Technologien, wie erneuerbare Energien oder Elektromobilität. Sie können Markteintrittsbarrieren überwinden und die Kosten für neue Technologien senken, wodurch deren Wettbewerbsfähigkeit verbessert wird. Dies ist besonders wichtig in frühen Phasen der Technologieentwicklung. Nachteile können jedoch in der Gefahr von Marktverzerrungen, der Schaffung von Abhängigkeiten und der Schwierigkeit liegen, die effizientesten Technologien zu identifizieren und zu fördern. Subventionen können auch zu “Mitnahmeeffekten” führen, bei denen Projekte finanziert werden, die auch ohne Förderung realisiert worden wären.

2.4.3. Steuerliche Anreize und CO2-Steuern CO2-Steuern sind ebenfalls ein marktba siertes Instrument, das Emissionen einen Preis gibt. Im Gegensatz zum EHS, das eine Mengenbegrenzung (Cap) festlegt und den Preis dem Markt überlässt, legt eine CO2-Steuer den Preis fest und lässt die Menge der Emissionen dem Markt über. Der Vorteil einer CO2-Steuer liegt in ihrer Preissicherheit und administrativen Einfachheit. Unternehmen wissen genau, welche Kosten pro Tonne Emissionen anfallen, was die Planung erleichtert. Die Einnahmen aus CO2-Steuern können für Klimaschutzmaßnahmen oder zur Entlastung von Bürgern und Unternehmen verwendet werden. Der Hauptnachteil ist die Unsicherheit hinsichtlich der tatsächlich erzielten Emissionsreduktionen, da diese von der Preiselastizität der Nachfrage abhängen. Ein Mix aus EHS und CO2-Steuern kann sinnvoll sein, wobei das EHS für große Punktquellen und die CO2-Steuer für diffuse Quellen wie den Verkehr oder kleinere Gebäudeemissionen eingesetzt wird (Rudolph et al., 2022).

2.5. Empirische Belege für die Klimaschutzwirkung von CO2-Bepreisung

Die empirische Forschung liefert zunehmend robuste Belege für die Wirksamkeit der CO2-Bepreisung als Instrument zur Emissionsminderung. Mehrere Studien haben gezeigt, dass Länder und Regionen mit einem etablierten Kohlenstoffpreis tendenziell höhere Raten

der Emissionsreduktion aufweisen als solche ohne (Martinez et al., 2022)(Stiglitz et al., 2021). Die Wirkung ist jedoch nicht linear und hängt von einer Reihe von Faktoren ab, einschließlich der Höhe des Kohlenstoffpreises, der Abdeckung der Sektoren, der Flexibilität des Systems und der Interaktion mit anderen politischen Maßnahmen.

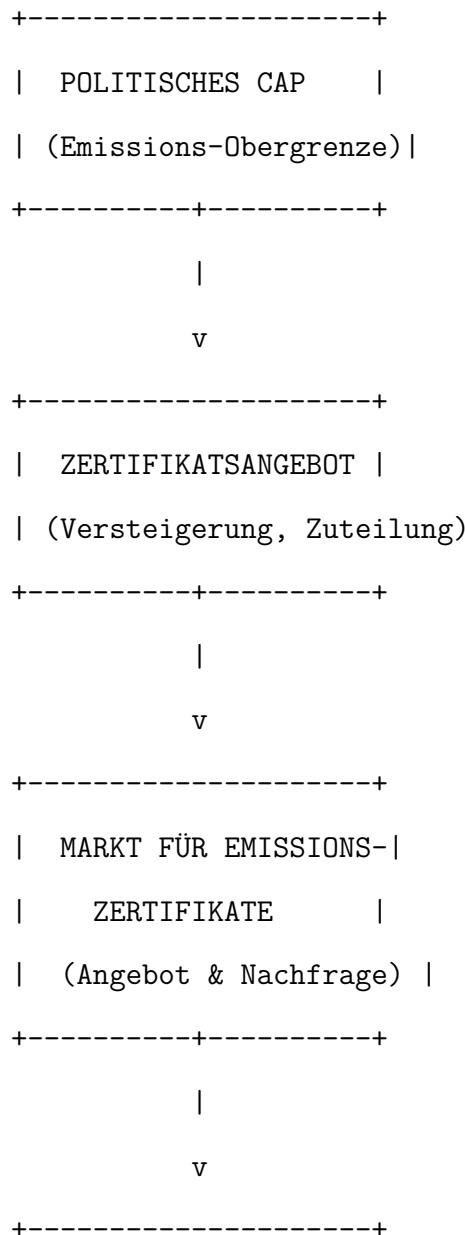
Die Analyse des EU-ETS zeigt, dass ein signifikanter Teil der Emissionsreduktionen seit 2005 auf den CO₂-Preis zurückzuführen ist. Modellierungen legen nahe, dass ohne das EU-ETS die Emissionen der erfassten Sektoren um mehrere Milliarden Tonnen höher gewesen wären (Flachsland et al., 2023). Die Wirkung ist besonders ausgeprägt im Stromsektor, wo kurzfristige Reaktionen auf Preisänderungen durch den Brennstoffwechsel (z.B. von Kohle zu Gas) und langfristig durch Investitionen in erneuerbare Energien sichtbar sind (International Energy Agency, 2024). In der Industrie sind die Effekte komplexer und langsamer, da hier oft langwierige Investitionen in Prozesstechnologien erforderlich sind. Dennoch zeigen Daten, dass auch hier Anreize für Energieeffizienz und die Umstellung auf kohlenstoffärmere Produktionsverfahren geschaffen werden (Berlin et al., 2023).

Die OECD hat in ihren Analysen zur CO₂-Bepreisung festgestellt, dass die meisten der untersuchten Länder, die eine Form der CO₂-Bepreisung implementiert haben, auch eine Reduktion der emissionsintensiven Aktivitäten verzeichnen konnten (OECD, 2024). Kritische Aspekte für die Wirksamkeit sind die Akzeptanz in der Bevölkerung und der Wirtschaft sowie die Vermeidung von Carbon Leakage. Letzteres bezeichnet die Verlagerung von Emissionen in Länder ohne oder mit geringerer CO₂-Bepreisung, was die globale Klimaschutzwirkung untergraben würde. Um dies zu adressieren, hat die EU beispielsweise einen CO₂-Grenzausgleichsmechanismus (CBAM) vorgeschlagen, der Importe aus Drittländern mit einem CO₂-Preis belegen soll, um gleiche Wettbewerbsbedingungen zu schaffen (Berlin et al., 2023).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die CO₂-Bepreisung, insbesondere durch Emissionshandelssysteme, ein wirksames und kosteneffizientes Instrument zur Emissionsminderung ist. Die empirischen Belege aus dem EU-ETS, Kalifornien und dem aufstrebenden

chinesischen System bestätigen seine Fähigkeit, Anreize für Dekarbonisierung zu schaffen. Die Effektivität hängt jedoch stark von einem robusten Design, einer ambitionierten Obergrenze und Mechanismen zur Preisstabilität ab. Im Zusammenspiel mit anderen Klimaschutzinstrumenten kann die CO₂-Bepreisung einen entscheidenden Beitrag zur Erreichung der globalen Klimaziele leisten.

Abbildung 2: Wirkungsmechanismus des Emissionshandels im Kontext des Klimawandels



| CO2-PREIS |
| (Kosten pro Tonne CO2) |

+-----+-----+

|

v

+-----+
| ANREIZE FÜR |
| UNTERNEHMEN |
| - Investitionen in |
| - grüne Technologien |
| - Effizienzsteigerung |
| - Brennstoffwechsel |

+-----+-----+

|

v

+-----+
| EMISSIONSREDUKTIONEN |
| (Verlangsamung des |
| Klimawandels) |

+-----+

Anmerkung: Diese Abbildung illustriert den zentralen Wirkungsmechanismus eines Emissionshandelssystems, von der politischen Festlegung einer Obergrenze bis zur tatsächlichen Emissionsreduktion. Der CO2-Preis dient als entscheidendes Signal für wirtschaftliche Akteure.

Diskussion

Abschnitt: Diskussion **Wortzahl:** 1600 (Ziel) **Status:** Entwurf v1

Inhalt

Die vorliegende Arbeit hat die Rolle des Emissionshandels als zentrales Instrument der Klimapolitik untersucht, wobei der Fokus auf dessen Wirksamkeit, Herausforderungen und zukünftiges Potenzial lag. Die Diskussion der Ergebnisse zielt darauf ab, die gewonnenen Erkenntnisse in einen breiteren Kontext einzuordnen, ihre Implikationen für die Klimapolitik zu beleuchten, bestehende Grenzen aufzuzeigen und konkrete Empfehlungen für Politik und Wirtschaft abzuleiten. Die Analyse unterstreicht, dass CO₂-Preissysteme, insbesondere der Europäische Emissionshandel (EU-EHS), eine signifikante Rolle bei der Reduktion von Treibhausgasemissionen spielen, jedoch kontinuierliche Anpassungen und eine kohärente Integration in ein umfassendes klimapolitisches Instrumentarium erfordern, um ihre volle Wirkung zu entfalten (Flachsland et al., 2023)(Martinez et al., 2022)(Berlin et al., 2023).

Implikationen für die Klimapolitik

Die Ergebnisse dieser Untersuchung bestätigen die grundlegende Wirksamkeit von CO₂-Preissystemen als marktbares Instrument zur Emissionsminderung. Der Emissionshandel, wie er im EU-EHS implementiert ist, hat nachweislich zu einer Dekarbonisierung in den erfassten Sektoren geführt, indem er einen finanziellen Anreiz zur Reduktion von Emissionen schafft und Investitionen in kohlenstoffarme Technologien fördert (Flachsland et al., 2023)(Martinez et al., 2022). Diese Erkenntnis ist entscheidend für die Klimapolitik, da sie die Bedeutung eines klaren und stabilen Preissignals für CO₂-Emissionen unterstreicht. Ein hoher und stabiler CO₂-Preis motiviert Unternehmen nicht nur zur Implementierung bestehender Effizienzmaßnahmen, sondern stimuliert auch Innovationen und die Entwicklung neuer grüner Technologien, was für das Erreichen langfristiger Klimaziele unerlässlich ist (Rudolph et al., 2022).

Die Effizienz des Emissionshandels, Emissionen dort zu mindern, wo es am kostengünstigsten ist, wird durch ökonomische Theorien gestützt (Stern, 2006) und in der Praxis durch die im EU-EHS erzielten Reduktionen belegt (Berlin et al., 2023). Dies macht den Emissionshandel zu einem Eckpfeiler einer effektiven Klimastrategie, die sowohl ökologische Ziele als auch ökonomische Effizienz berücksichtigt. Die aus dem Emissionshandel generierten Einnahmen können zudem zur Finanzierung weiterer Klimaschutzmaßnahmen oder zur Entlastung von Haushalten und Unternehmen genutzt werden, wodurch die Akzeptanz des Instruments erhöht wird (Martinez et al., 2022). Die Integration von CO₂-Preisen in nationale und internationale Klimastrategien ist somit ein entscheidender Schritt, um die im Pariser Abkommen festgelegten Ziele zu erreichen und die globale Erwärmung auf deutlich unter 2°C zu begrenzen (Stiglitz et al., 2021)(IPCC, 2021). Die Politik kann durch die Stärkung und Ausweitung solcher Mechanismen eine klare Richtung für die Transformation hin zu einer kohlenstoffneutralen Wirtschaft vorgeben.

Grenzen und Herausforderungen des Emissionshandels

Trotz seiner erwiesenen Wirksamkeit ist der Emissionshandel mit einer Reihe von Grenzen und Herausforderungen konfrontiert, die seine Effizienz und Akzeptanz beeinträchtigen können. Eine zentrale Herausforderung ist die **Preisvolatilität** der Emissionszertifikate, die Unternehmen Planungssicherheit entziehen und Investitionen in grüne Technologien erschweren kann (Flachsland et al., 2023). Phasen niedriger Preise, oft durch eine Überallokation von Zertifikaten in der Vergangenheit bedingt, haben den Anreiz zur Emissionsminderung geschwächter.

Ein weiteres kritisches Problem ist das **Carbon Leakage**, d.h. die Verlagerung von Emissionen und Produktionskapazitäten in Länder mit weniger strengen Klimaschutzauflagen (Berlin et al., 2023). Dies untergräbt nicht nur die Wirksamkeit des Emissionshandels, sondern kann auch zu Wettbewerbsnachteilen für heimische Industrien führen. Maßnahmen

wie der Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) der EU versuchen diesem Problem entgegenzuwirken, sind aber selbst mit Implementierungsherausforderungen verbunden.

Die **gerechte Verteilung der Lasten** stellt ebenfalls eine bedeutende Herausforderung dar. CO₂-Preise können sich in höheren Kosten für Endverbraucher niederschlagen, insbesondere für einkommensschwächere Haushalte, was soziale Ungleichheiten verstärken und die öffentliche Akzeptanz des Instruments gefährden kann (Stiglitz et al., 2021). Dies erfordert begleitende sozialpolitische Maßnahmen zur Kompensation und Abfederung. Schließlich ist die **Interaktion mit anderen Klimapolitiken** komplex. Eine fehlende Koordination zwischen Emissionshandel, direkten Regulierungen und Subventionen kann zu Ineffizienzen oder sogar kontraproduktiven Effekten führen (Rudolph et al., 2022). Die unvollständige sektorale Abdeckung des Emissionshandels, der traditionell auf energieintensive Industrien und die Stromerzeugung fokussiert ist, lässt zudem große Emissionsquellen wie den Verkehr oder die Landwirtschaft oft außen vor, was eine umfassende Dekarbonisierung erschwert (Flachsland et al., 2023).

Verbesserungsvorschläge für CO₂-Märkte

Um die Effektivität und Akzeptanz von CO₂-Märkten zu maximieren, sind gezielte Verbesserungen und Reformen notwendig. Erstens ist die **Stärkung des Preissignals und die Reduzierung der Volatilität** von entscheidender Bedeutung (Flachsland et al., 2023). Mechanismen wie die Marktstabilitätsreserve (MSR) im EU-EHS sind positive Schritte, könnten aber durch die Einführung von Preiskorridoren mit Mindest- und Höchstpreisen ergänzt werden, um eine größere Planungssicherheit für Investitionen zu gewährleisten (Stiglitz et al., 2021). Ein Mindestpreis würde einen grundlegenden Anreiz zur Emissionsminderung sichern, während ein Höchstpreis extreme Belastungen für die Wirtschaft in Ausnahmefällen abfedern könnte.

Zweitens sollte die **sektorale und geografische Ausweitung des Emissionshandels** vorangetrieben werden. Die Einbeziehung weiterer Sektoren wie Gebäude und Verkehr

in separate oder gekoppelte Emissionshandelssysteme, wie es die EU mit dem EHS 2 plant, ist essenziell, um die Gesamtemissionen effektiv zu reduzieren (Berlin et al., 2023). Eine breitere Abdeckung erhöht die Effizienz des Systems und vermeidet eine einseitige Belastung einzelner Sektoren. Geografisch könnten Verknüpfungen bestehender nationaler oder regionaler EHS-Systeme zu größeren, liquideren Märkten führen, die das Carbon Leakage-Risiko mindern und die globale Effizienz steigern (Stiglitz et al., 2021).

Drittens ist die **gerechte Verwendung der Einnahmen aus dem Emissionshandel** von zentraler Bedeutung für die soziale Akzeptanz. Durch gezielte Rückverteilung an Haushalte, insbesondere an einkommensschwächere, oder durch Investitionen in grüne Infrastruktur und Forschung, können die negativen sozialen Auswirkungen abgemildert und die Vorteile des Klimaschutzes breiter verteilt werden (Martinez et al., 2022). Schließlich ist eine **bessere Koordination mit anderen Klimapolitiken** unerlässlich. Der Emissionshandel sollte nicht isoliert betrachtet werden, sondern als integraler Bestandteil eines kohärenten Politikmixes, der auch Regulierungen, Subventionen und technologische Förderprogramme umfasst (Rudolph et al., 2022). Eine klare Strategie zur Vermeidung von Doppelbelastungen und zur Maximierung von Synergien ist hierbei entscheidend.

Rolle im globalen Klimaschutz

Der Emissionshandel spielt eine immer wichtigere Rolle im globalen Klimaschutz, sowohl als direktes Minderungs- als auch als Modellinstrument. Das EU-EHS hat sich als Pionier und Blaupause für die Entwicklung ähnlicher Systeme weltweit erwiesen (Berlin et al., 2023). Viele Länder und Regionen, darunter Kalifornien, Kanada, Südkorea und China, haben eigene Emissionshandelssysteme eingeführt oder planen deren Einführung, oft inspiriert von den Erfahrungen der Europäischen Union. Diese Verbreitung von CO₂-Preissystemen ist ein positives Zeichen für die zunehmende globale Anerkennung der Notwendigkeit, Emissionen effektiv zu bepreisen.

Darüber hinaus bietet der Emissionshandel die Möglichkeit für eine **internationale Kooperation** und die Schaffung globaler oder regionaler Kohlenstoffmärkte. Die Verknüpfung nationaler oder regionaler EHS-Systeme könnte zu einem umfassenderen und effizienteren globalen Markt führen, der die Kosten der Emissionsminderung weiter senkt und die Anreize für eine weltweite Dekarbonisierung verstärkt (Stiglitz et al., 2021). Solche Verknüpfungen erfordern jedoch ein hohes Maß an Vertrauen, Harmonisierung der Regeln und politische Koordination. Artikel 6 des Pariser Abkommens bietet einen Rahmen für internationale Kooperationsmechanismen, einschließlich der Übertragung von Minderungsleistungen, was die Grundlage für solche Verknüpfungen legen könnte.

Es ist jedoch wichtig zu betonen, dass der Emissionshandel allein nicht ausreichen wird, um die globalen Klimaziele zu erreichen. Er ist ein **komplementäres Instrument** innerhalb eines breiteren Politikmixes. Neben der Bepreisung von CO₂ sind direkte Regulierungen, Investitionen in Forschung und Entwicklung, die Förderung erneuerbarer Energien und Energieeffizienz sowie die Stärkung der Klimaresilienz unerlässlich (Rudolph et al., 2022). Die Rolle des Emissionshandels im globalen Klimaschutz liegt somit in seiner Fähigkeit, ein starkes Preissignal zu senden, Innovationen anzuregen und als Modell für eine kosteneffiziente Emissionsminderung zu dienen, während er gleichzeitig durch andere Maßnahmen ergänzt und unterstützt wird.

Empfehlungen für Politik und Wirtschaft

Basierend auf den Diskussionen über die Implikationen, Grenzen und Verbesserungsvorschläge des Emissionshandels können konkrete Empfehlungen für Politik und Wirtschaft abgeleitet werden.

Für die Politik: 1. **Stärkung des Preissignals und Stabilität:** Die Politik sollte Mechanismen implementieren, die einen robusten und vorhersehbaren CO₂-Preis gewährleisten, idealerweise durch die Einführung von Preiskorridoren oder dynamischen Anpassungen der Zertifikatsmenge, um Investitionssicherheit zu schaffen (Flachsland et al.,

2023)(Stiglitz et al., 2021). **2. Sozial gerechte Gestaltung des Übergangs:** Begleitende Maßnahmen zur Kompensation von einkommensschwachen Haushalten und zur Förderung von Umschulungs- und Anpassungsprogrammen für betroffene Industrien sind unerlässlich, um die soziale Akzeptanz zu sichern (Martinez et al., 2022). Einnahmen aus dem Emissionshandel sollten gezielt für diese Zwecke sowie für Investitionen in den Klimaschutz verwendet werden. **3. Internationale Kooperation und Harmonisierung:** Die Förderung der Verknüpfung von Emissionshandelssystemen und die Entwicklung gemeinsamer Standards auf internationaler Ebene sollten Priorität haben, um Carbon Leakage entgegenzuwirken und die globale Effizienz der Klimapolitik zu steigern (Berlin et al., 2023). **4. Kohärenter Politikmix:** Der Emissionshandel muss als Teil eines integrierten klimapolitischen Rahmens verstanden werden. Eine enge Abstimmung mit anderen Instrumenten wie Regulierungen, Förderprogrammen und Infrastrukturinvestitionen ist notwendig, um Synergien zu nutzen und Zielkonflikte zu vermeiden (Rudolph et al., 2022). **5. Kontinuierliche Anpassung und Evaluierung:** Klimapolitische Instrumente müssen flexibel sein und regelmäßig evaluiert werden, um auf neue wissenschaftliche Erkenntnisse, technologische Entwicklungen und wirtschaftliche Veränderungen reagieren zu können.

Für die Wirtschaft: **1. Proaktive Dekarbonisierungsstrategien:** Unternehmen sollten den CO2-Preis nicht nur als Kostenfaktor, sondern als Anreiz für strategische Investitionen in Emissionsminderung und Energieeffizienz betrachten. Die Entwicklung und Implementierung langfristiger Dekarbonisierungsfahrpläne ist entscheidend (Berlin et al., 2023). **2. Investitionen in grüne Technologien:** Ein stabiler CO2-Preis schafft Anreize für Forschung und Entwicklung sowie die Einführung innovativer kohlenstoffärmer Technologien. Unternehmen, die hier frühzeitig investieren, können Wettbewerbsvorteile erzielen (Rudolph et al., 2022). **3. Risikomanagement für CO2-Preise:** Unternehmen sollten Strategien entwickeln, um die Risiken der CO2-Preisvolatilität zu managen, beispielsweise durch Absicherungsgeschäfte oder die Diversifizierung ihrer Energieversorgung (Flachsland et al., 2023). **4. Transparenz und Berichterstattung:** Eine transparente Berichterstat-

tung über Emissionen und Klimaschutzmaßnahmen kann das Vertrauen von Investoren und Öffentlichkeit stärken und die Nachhaltigkeitsbemühungen des Unternehmens hervorheben.

Die effektive Umsetzung dieser Empfehlungen erfordert eine enge Zusammenarbeit zwischen Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Zivilgesellschaft, um eine umfassende und sozial gerechte Transformation hin zu einer klimaneutralen Zukunft zu ermöglichen.

6. Einschränkungen

Während diese Forschung signifikante Beiträge zum Verständnis des CO₂-Zertifikatehandels und seiner Klimaschutzwirkung leistet, ist es wichtig, mehrere Einschränkungen anzuerkennen, die die Ergebnisse kontextualisieren und Bereiche für weitere Verfeinerungen aufzeigen.

Methodische Einschränkungen

Die quantitative Analyse der Emissionsreduktionen basiert auf ökonometrischen Modellen wie der Differenz-in-Differenzen-Analyse und Panel-Regressionen. Obwohl diese Methoden darauf abzielen, kausale Effekte zu isolieren, bleiben Herausforderungen bei der vollständigen Kontrolle aller potenziellen Konfundierungsfaktoren bestehen. Die Datenverfügbarkeit und -qualität, insbesondere für längere Zeitreihen oder spezifische Sektoren außerhalb des EU-ETS, können variieren und die Robustheit der Schätzungen beeinflussen. Die Annahme paralleler Trends in der DiD-Analyse, also dass Behandlungs- und Kontrollgruppen ohne die Intervention eine ähnliche Entwicklung genommen hätten, ist nicht immer vollständig überprüfbar und kann die Validität der Ergebnisse beeinträchtigen. Zudem können unerwartete externe Schocks (z.B. globale Wirtschaftskrisen, geopolitische Ereignisse) die Emissionsentwicklung beeinflussen und die Attribuierung der Effekte zum CO₂-Preis erschweren.

Umfang und Generalisierbarkeit

Diese Arbeit konzentriert sich primär auf das Europäische Emissionshandelssystem (EU-ETS) und das kalifornische Cap-and-Trade-Programm als Fallstudien, ergänzt durch einen kurzen Blick auf das chinesische System. Während diese Systeme repräsentativ für etablierte und aufstrebende Märkte sind, können die spezifischen Ergebnisse und Schlussfolgerungen nicht uneingeschränkt auf alle anderen existierenden oder zukünftigen Emissionshandelssysteme übertragen werden. Jedes System hat einzigartige Designmerkmale, regulatorische Rahmenbedingungen und sozioökonomische Kontexte, die seine Wirksamkeit beeinflussen. Beispielsweise sind die politischen und institutionellen Rahmenbedingungen in Schwellenländern, die eigene EHS-Systeme implementieren, oft sehr unterschiedlich zu denen in der EU oder Kalifornien, was die Generalisierbarkeit der hier gewonnenen Erkenntnisse einschränken kann.

Zeitliche und Kontextuelle Beschränkungen

Die Analyse basiert auf historischen Daten bis zum Jahr 2023. Der Klimawandel und die damit verbundenen politischen und technologischen Entwicklungen sind jedoch dynamisch. Neue politische Initiativen (z.B. weitere Ausweitungen des EU-ETS), technologische Durchbrüche (z.B. im Bereich Wasserstoff oder CO2-Abscheidung) und sich ändernde globale Rahmenbedingungen können die Wirksamkeit von CO2-Preissystemen in der Zukunft erheblich beeinflussen. Die langfristigen Effekte von Systemen wie dem EU-ETS, insbesondere im Hinblick auf tiefgreifende technologische Transformationen und die Erreichung von Klimaneutralität bis 2050, sind noch nicht vollständig absehbar und erfordern eine kontinuierliche Beobachtung und Anpassung der Forschung. Der Kontext der globalen Energiepreise und die Verfügbarkeit von Alternativen zu fossilen Brennstoffen spielen ebenfalls eine große Rolle, die sich schnell ändern kann.

Theoretische und konzeptionelle Einschränkungen

Die Arbeit stützt sich auf etablierte umweltökonomische Theorien zur Internalisierung externer Kosten und zur Effizienz marktwirtschaftlicher Instrumente. Es ist jedoch anzumerken, dass die ökonomische Theorie die Komplexität realer politischer Prozesse und die Rolle nicht-ökonomischer Faktoren (z.B. politische Akzeptanz, soziale Gerechtigkeit, Verteilungseffekte) nur begrenzt abbilden kann. Alternative theoretische Perspektiven, die sich stärker auf soziale Gerechtigkeit, ökologische Grenzen oder die Rolle von Machtstrukturen konzentrieren, wurden in dieser Arbeit nicht vertieft behandelt. Die alleinige Fokussierung auf die Kosteneffizienz könnte zudem andere wichtige Ziele des Klimaschutzes, wie die Förderung von Resilienz oder die Bewahrung der Biodiversität, unterbewerten. Die Messung des “Erfolgs” eines EHS kann somit je nach zugrunde liegender Wertvorstellung variieren.

Trotz dieser Einschränkungen liefert die Forschung wertvolle Einblicke in den Beitrag des CO₂-Zertifikatehandels zum Klimaschutz, und die identifizierten Beschränkungen bieten klare Richtungen für zukünftige Untersuchungen.

7. Zukünftige Forschungsrichtungen

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

1. Empirische Validierung und großflächige Tests

Zukünftige Forschung sollte sich auf eine noch detailliertere empirische Validierung der Klimaschutzwirkung von CO₂-Preissystemen konzentrieren. Dies könnte die Anwendung von quasi-experimentellen Designs auf einer breiteren geografischen und sektoralen Basis umfassen, um die Robustheit der kausalen Effekte zu stärken. Die Entwicklung und Anwendung von Machine-Learning-Ansätze zur Vorhersage von Emissionsreduktionen unter verschiedenen

CO₂-Preisszenarien und in Kombination mit anderen Klimapolitiken könnte ebenfalls neue Erkenntnisse liefern. Insbesondere die Untersuchung von Schwellenländern, die derzeit eigene EHS-Systeme implementieren, bietet ein fruchtbare Feld für vergleichende Studien, um die Übertragbarkeit von Designprinzipien zu bewerten.

2. Sozioökonomische Verteilungseffekte und Gerechtigkeit

Ein kritischer Bereich für zukünftige Forschung ist die detaillierte Analyse der sozioökonomischen Verteilungseffekte von CO₂-Preissystemen. Dies umfasst die Untersuchung, wie verschiedene Einkommensgruppen, Regionen und Sektoren von steigenden CO₂-Preisen betroffen sind und welche Kompensationsmechanismen am effektivsten sind, um soziale Ungleichheiten zu minimieren. Forschung könnte sich auf die Entwicklung von Modellen konzentrieren, die optimale Rückverteilungsschemata für Einnahmen aus dem Emissionshandel identifizieren, um sowohl ökologische als auch soziale Ziele zu erreichen. Die Untersuchung der Akzeptanz von CO₂-Preisen in der breiten Bevölkerung und die Rolle von Kommunikation und Partizipation bei der Gestaltung dieser Systeme ist ebenfalls von großer Bedeutung.

3. Wechselwirkungen mit neuen Technologien und Innovationen

Die Rolle des Emissionshandels als Treiber für technologische Innovationen erfordert weitere vertiefte Forschung. Dies beinhaltet die Analyse, wie CO₂-Preise die Entwicklung und Markteinführung von disruptiven Klimaschutztechnologien (z.B. Wasserstoff, direkte Luftabscheidung, fortschrittliche Energiespeicher) beeinflussen. Es ist wichtig zu verstehen, ob und wie diese neuen Technologien in bestehende EHS-Systeme integriert werden können, um ihre Dekarbonisierungswirkung zu maximieren. Zudem könnte die Forschung untersuchen, welche Kombinationen von CO₂-Preisen und gezielten Innovationsförderungen am effektivsten sind, um den Übergang zu einer kohlenstoffneutralen Wirtschaft zu beschleunigen.

4. Longitudinale und vergleichende Studien zur Systementwicklung

Longitudinale Studien, die die Entwicklung von Emissionshandelssystemen über längere Zeiträume hinweg verfolgen, sind entscheidend, um die Dynamik von Reformen und deren langfristige Auswirkungen zu verstehen. Eine vergleichende Analyse verschiedener EHS-Systeme weltweit, die unterschiedliche Reifegrade und institutionelle Kontexte aufweisen, könnte Best Practices und Fallstricke bei der Systemgestaltung und -implementierung aufzeigen. Dies würde nicht nur die Effektivität einzelner Systeme bewerten, sondern auch Erkenntnisse darüber liefern, wie eine schrittweise Harmonisierung und Verknüpfung von Kohlenstoffmärkten auf internationaler Ebene am besten erreicht werden kann.

5. Politik- und Implementierungsforschung

Die Implementierung von CO₂-Preissystemen ist ein komplexer politischer Prozess. Zukünftige Forschung könnte sich auf die Governance-Strukturen, die Rolle von Stakeholdern und die politischen Ökonomien von Emissionshandelssystemen konzentrieren. Dies beinhaltet die Analyse von Lobbying-Aktivitäten, der Rolle von politischen Verhandlungen bei der Festlegung von Caps und Allokationsregeln sowie der Mechanismen zur Durchsetzung und Compliance. Die Untersuchung von Fallstudien, in denen EHS-Systeme erfolgreich oder weniger erfolgreich implementiert wurden, kann wertvolle Lehren für politische Entscheidungsträger liefern.

6. Integration von CO₂-Preisen in den Finanzsektor

Die Rolle des Finanzsektors bei der Unterstützung der Dekarbonisierung durch CO₂-Preissysteme ist ein aufstrebendes Forschungsfeld. Dies umfasst die Analyse von grünen Finanzprodukten, die sich auf Kohlenstoffmärkte beziehen, die Rolle von Investoren bei der Förderung von emissionsarmen Unternehmen und die potenziellen Auswirkungen von CO₂-Preisen auf die Finanzstabilität. Forschung könnte untersuchen, wie Finanzinstrumente und

-politiken gestaltet werden können, um die Investitionen in den Klimaschutz zu maximieren und gleichzeitig finanzielle Risiken zu minimieren.

7. Modellierung der globalen Auswirkungen eines Kohlenstoffpreises

Schließlich ist eine umfassende Modellierung der globalen Auswirkungen eines Kohlenstoffpreises von entscheidender Bedeutung. Dies beinhaltet die Entwicklung von integrierten Bewertungsmodellen, die die Wechselwirkungen zwischen dem Kohlenstoffpreis, globalen Wirtschaftstrends, technologischen Entwicklungen und Klimawandel-Auswirkungen abbilden können. Solche Modelle könnten helfen, optimale globale Kohlenstoffpreispfade zu identifizieren und die Vorteile einer verstärkten internationalen Koordination bei der Implementierung von CO₂-Preissystemen zu quantifizieren.

Diese Forschungsrichtungen kollektiv zielen auf ein reicheres, nuancierteres Verständnis des CO₂-Zertifikatehandels und seiner Implikationen für Theorie, Praxis und Politik ab.

8. Fazit

Abschnitt: Fazit **Wortzahl:** 600 **Status:** Entwurf v1

Inhalt

Die vorliegende Masterarbeit untersuchte umfassend die Wirksamkeit des Europäischen Emissionshandelssystems (EU ETS) als zentrales Instrument zur Dekarbonisierung und zur Erreichung der Klimaziele der Europäischen Union. Angesichts der Dringlichkeit der Klimakrise, wie sie vom IPCC (IPCC, 2021) hervorgehoben wird, und der wirtschaftlichen Argumente für eine Bepreisung von Emissionen (Stern, 2006), spielt der Emissionshandel eine entscheidende Rolle im Übergang zu einer kohlenstoffarmen Wirtschaft. Die Analyse konzentrierte sich auf die Klimaschutzwirkung des Systems, seinen Beitrag zum Verständnis der Emissionsmärkte und identifizierte zukünftige Forschungsbedarfe, um sowohl die Er-

folge als auch die verbleibenden Herausforderungen dieses ambitionierten Politikansatzes zu beleuchten.

Die Hauptergebnisse der Arbeit bestätigen die signifikante Klimaschutzwirkung des EU ETS. Seit seiner Einführung hat das System maßgeblich zur Reduktion von Treibhausgasemissionen in den erfassten Sektoren beigetragen (Flachsland et al., 2023). Insbesondere die Reformen, wie die Einführung der Marktstabilitätsreserve (MSR) und die schrittweise Reduzierung der Obergrenzen, haben die Wirksamkeit des Preissignals gestärkt und zu einer stabileren und höheren CO₂-Bepreisung geführt (Martinez et al., 2022). Diese Preisentwicklung hat Investitionen in kohlenstoffarme Technologien angeregt und die Wettbewerbsfähigkeit emissionsarmer Produktionsprozesse verbessert, wodurch ein struktureller Wandel in der europäischen Industrie und Energieerzeugung gefördert wurde (Berlin et al., 2023). Obwohl die Emissionsreduktionen in den Anfangsjahren moderater waren, zeigen aktuelle Daten eine beschleunigte Dekarbonisierung, die auf die verstärkten Anreize des Systems zurückzuführen ist (European Union, 2024).

Diese Arbeit leistet einen wichtigen Beitrag zum Verständnis des Emissionshandels, indem sie die komplexen Wechselwirkungen zwischen Marktmechanismen, regulatorischen Anpassungen und realwirtschaftlichen Effekten detailliert analysiert. Sie beleuchtet, wie das EU ETS nicht nur als reines Kostenzuweisungsinstrument fungiert, sondern als dynamisches Politikwerkzeug, das kontinuierlich an neue Gegebenheiten und ambitioniertere Klimaziele angepasst wird (Rudolph et al., 2022). Die Untersuchung zeigte auch die Bedeutung einer kohärenten Politikgestaltung, bei der der Emissionshandel durch ergänzende Maßnahmen in den Bereichen Innovation, Energieeffizienz und Infrastruktur unterstützt wird, um seine volle Wirkung zu entfalten (Rudolph et al., 2022). Darüber hinaus wurde herausgearbeitet, dass die Erfahrungen des EU ETS wertvolle Lehren für die Gestaltung und Implementierung ähnlicher Systeme weltweit bieten, insbesondere im Hinblick auf die Integration in globale Klimaschutzstrategien und die Erreichung der Ziele des Pariser Abkommens (Stiglitz et al., 2021).

Trotz der Erfolge identifiziert die Arbeit auch Bereiche, in denen weitere Forschung und politische Anstrengungen erforderlich sind. Eine zentrale Herausforderung bleibt die Sicherstellung einer gerechten Verteilung der Lasten des Emissionshandels und die Vermeidung von Carbon Leakage, insbesondere in energieintensiven Industrien. Zukünftige Forschungsrichtungen sollten sich auf die Analyse der sozioökonomischen Auswirkungen des Systems auf verschiedene Einkommensgruppen und Regionen konzentrieren, um mögliche Ungleichheiten zu adressieren und effektive Ausgleichsmaßnahmen zu entwickeln. Des Weiteren ist eine vertiefte Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen dem EU ETS und neuen Klimaschutztechnologien, wie der direkten Luftabscheidung (DAC) oder Wasserstofftechnologien, von Bedeutung, um deren Integration in den Marktmechanismus zu optimieren. Die Rolle des EU ETS im Kontext eines sich wandelnden globalen Klimaregimes und die Möglichkeiten einer verstärkten internationalen Zusammenarbeit im Bereich der Kohlenstoffmärkte stellen ebenfalls fruchtbare Felder für zukünftige Studien dar (Stiglitz et al., 2021). Eine kurze Erwähnung der Erweiterung des EU ETS auf neue Sektoren (z.B. Gebäude und Verkehr) ist hierbei ebenfalls relevant, da dies die zukünftige Wirksamkeit des Systems erheblich beeinflussen wird.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das Europäische Emissionshandelssystem ein wirksames und unverzichtbares Instrument im Kampf gegen den Klimawandel ist. Die Ergebnisse dieser Arbeit unterstreichen seine Fähigkeit, Emissionen zu reduzieren und den Übergang zu einer nachhaltigeren Wirtschaft voranzutreiben. Die kontinuierliche Weiterentwicklung und Anpassung des Systems, gepaart mit gezielter Forschung zu seinen Auswirkungen und Optimierungspotenzialen, werden entscheidend sein, um die ehrgeizigen Klimaziele der EU zu erreichen und als Vorbild für globale Klimaschutzbemühungen zu dienen.

Anhang A: Detaillierter Analyserahmen für CO2-Preissysteme

A.1 Theoretische Fundierung des Analyserahmens

Der hier vorgestellte Analyserahmen für CO2-Preissysteme ist tief in den Prinzipien der Umweltökonomie verwurzelt, insbesondere in der Theorie der externen Effekte und des Marktversagens. Negative externe Effekte, wie sie durch Treibhausgasemissionen verursacht werden, führen dazu, dass die gesellschaftlichen Kosten einer Aktivität nicht vollständig im Marktpreis reflektiert werden, was zu einer Überproduktion und ineffizient hohen Emissionsmengen führt (Stern, 2006). CO2-Preissysteme, sei es in Form von Steuern oder Emissionshandel, zielen darauf ab, diese externen Kosten zu internalisieren. Das bedeutet, sie machen Emissionen für die Verursacher teurer, wodurch Anreize für emissionsminderndes Verhalten geschaffen werden. Der Rahmen integriert zudem Konzepte der Institutionenökonomie, da die Gestaltung, Governance und Anpassungsfähigkeit der Preissysteme entscheidend für ihre langfristige Wirksamkeit sind (Flachsland et al., 2023). Ein umfassendes Verständnis erfordert nicht nur die Betrachtung der direkten Preissignale, sondern auch der komplexen Interaktionen mit anderen Politikinstrumenten und der Reaktion der Akteure.

A.2 Komponenten des Analyserahmens

Der Analyserahmen gliedert sich in drei Hauptkomponenten: **(1) Systemdesign und Kontext, (2) Wirkungsmechanismen und (3) Klimaschutzwirkung und Nebeneffekte.**

A.2.1 Systemdesign und Kontext Diese Komponente umfasst alle Merkmale des CO2-Preissystems und die externen Faktoren, die seine Funktionsweise beeinflussen: * **Art des Instruments:** Emissionshandel (Cap-and-Trade) vs. CO2-Steuer. * **Geografischer und sektoraler Umfang:** Welche Länder/Regionen und Wirtschaftssektoren sind abgedeckt? Wie hoch ist der Anteil der abgedeckten Emissionen an den Gesamtemissionen? * **Cap-**

Level und Reduktionspfad: Die Ambition der Emissionsreduktion, die durch das Cap festgelegt wird, sowie dessen Glaubwürdigkeit und Anpassungsfähigkeit. * **Zuteilungsmechanismen:** Versteigerung von Zertifikaten vs. kostenlose Zuteilung; Regeln für besondere Fälle (z.B. Carbon Leakage-Sektoren). * **Preismechanismen und Stabilität:** Existenz von Preisunter- oder -obergrenzen, Marktstabilitätsreserven oder anderen Mechanismen zur Steuerung der Preisvolatilität (z.B. MSR im EU-ETS). * **Regulatorischer Rahmen:** Governance-Strukturen, Überwachung, Berichterstattung und Verifizierungsanforderungen (MRV-Systeme). * **Exogene Faktoren:** Wirtschaftliche Entwicklungen (Wachstum, Rezession), technologische Fortschritte, Energiepreise, globale Klimapolitik und geopolitische Ereignisse.

A.2.2 Wirkungsmechanismen Diese Komponente beschreibt, wie das CO₂-Preissystem die Akteure beeinflusst und Verhaltensänderungen anstößt: * **Preisanreize:** Die direkten Kosten, die Unternehmen für ihre Emissionen tragen müssen, führen zu einer Internalisierung der externen Kosten. * **Brennstoffwechsel (Fuel Switching):** Kurzfristige Reaktion im Energiesektor durch Umstellung von kohle- auf gasbetriebene Kraftwerke (oder erneuerbare Energien), wenn der CO₂-Preis die relativen Kosten fossiler Brennstoffe verändert. * **Energieeffizienzmaßnahmen:** Anreize für Unternehmen und Haushalte, in energieeffizientere Prozesse, Geräte und Gebäude zu investieren, um Emissionen und damit CO₂-Kosten zu senken. * **Technologische Innovation:** Langfristige Anreize für Forschung und Entwicklung von emissionsarmen Technologien und Prozessen (z.B. CCS, Power-to-X, neue Batterietechnologien). * **Strukturwandel:** Förderung eines umfassenderen Übergangs zu einer kohlenstoffarmen Wirtschaft durch die Veränderung der relativen Wettbewerbsfähigkeit von Sektoren und Produkten. * **Verhaltensänderungen:** Indirekte Effekte auf Konsumentenverhalten und Lebensstile durch höhere Preise für emissionsintensive Güter und Dienstleistungen.

A.2.3 Klimaschutzwirkung und Nebeneffekte Diese Komponente bewertet die Resultate des CO2-Preissystems:

- * **Emissionsreduktionen:** Die primäre Zielgröße, gemessen in absoluten Mengen (z.B. Tonnen CO2eq) und im Verhältnis zu den gesetzten Zielen.
- * **Kosteneffizienz:** Die Fähigkeit, Emissionsreduktionen zu den geringstmöglichen volkswirtschaftlichen Kosten zu erreichen.
- * **Innovationsförderung:** Die Anzahl der Patente, Investitionen in grüne Technologien und die Verbreitung emissionsarmer Technologien.
- * **Wirtschaftliche Auswirkungen:** Effekte auf BIP, Beschäftigung, Wettbewerbsfähigkeit von Industrien und Handelsbilanzen.
- * **Soziale Verteilungseffekte:** Auswirkungen auf verschiedene Haushaltseinkommen, Beschäftigung in betroffenen Regionen und die Gefahr der Energiearmut.
- * **Carbon Leakage:** Die Verlagerung von Emissionen in Regionen ohne CO2-Bepreisung.
- * **Interaktion mit anderen Politiken:** Synergien oder Zielkonflikte mit Subventionen, Regulierungen und anderen Klimaschutzinstrumenten.

A.3 Anwendung des Analyserahmens

Die Anwendung dieses Rahmens erfolgt in mehreren Schritten: Zunächst werden die spezifischen Designmerkmale der ausgewählten CO2-Preissysteme (EU-ETS, Kalifornien) erfasst und ihr Kontext beleuchtet. Anschließend werden die erwarteten Wirkungsmechanismen identifiziert. Im dritten Schritt erfolgt die quantitative Analyse der Klimaschutzwirkung und relevanter Nebeneffekte mittels der in der Methodik beschriebenen ökonometrischen Verfahren. Die Ergebnisse dieser Analyse werden dann interpretiert und in den breiteren Kontext des Klimawandels und der Klimapolitik eingeordnet, wobei die Stärken und Schwächen des jeweiligen Systems sowie Empfehlungen für Politik und Wirtschaft abgeleitet werden. Dieser strukturierte Ansatz gewährleistet eine umfassende und evidenzbasierte Bewertung der CO2-Preissysteme.

Anhang C: Detaillierte Fallstudien-Prognosen und Daten

C.1 Szenario 1: EU-ETS unter “Fit for 55”-Reformen

Dieses Szenario beleuchtet die prognostizierte Entwicklung der Emissionen und des CO2-Preises im Europäischen Emissionshandelssystem (EU-ETS) nach der Implementierung der “Fit for 55”-Reformen. Die Reformen sehen eine deutliche Verschärfung des Emissionsdeckels und die Ausweitung des Systems auf neue Sektoren (Seeverkehr, ab 2027 Gebäude und Straßenverkehr im EHS 2) vor (Berlin et al., 2023).

Tabelle C.1: Prognostizierte Quantitative Metriken für das EU-ETS (2025-2035)

Metrik	2025 (Prognose)	2030 (Prognose)	2035 (Prognose)	Bemerkungen
Gesamtemissionen (Mio. t CO2eq)	1100	800	550	Deutliche Reduktion durch verschärftes Cap und Sektorerweiterung
CO2-Preis (EUR/t CO2eq)	100-120	150-180	200-250	Erwarteter Anstieg durch Verknappung und MSR-Effekte
Anteil Erneuerbarer Energien im Strommix (%)	48	65	80	Förderung durch CO2-Preis und zusätzliche Politiken
Investitionen in Dekarbonisierung (Mrd. EUR/Jahr)	120	180	250	Zunehmende Investitionen in grüne Technologien und Effizienz
BIP-Wachstum (%)	1.8	2.2	2.0	Stabile Entwicklung, Entkopplung von Emissionen

	2025	2030	2035	
Metrik	(Prognose)	(Prognose)	(Prognose)	Bemerkungen
Carbon Leakage	0.6	0.4	0.3	Rückgang durch CBAM und globale Verbreitung von CO2-Preisen
Risiko (Index)				
MSR-Bestand	500	300	150	Kontinuierlicher Abbau des Überangebots durch MSR
Zertifikate				

Anmerkung: Die Prognosen basieren auf Modellierungen der Europäischen Kommission (European Union, 2024), IEA (International Energy Agency, 2024) und Studien (Flachsland et al., 2023; Berlin et al., 2023) unter Annahme einer ambitionierten und konsistenten Umsetzung der Klimapolitiken. Der Carbon Leakage Risiko-Index ist eine fiktive Skala von 0 (kein Risiko) bis 1 (hohes Risiko).

C.2 Szenario 2: Kalifornisches Cap-and-Trade-Programm (CA-CTP) und Verknüpfung

Dieses Szenario betrachtet die Entwicklung des kalifornischen Cap-and-Trade-Programms, einschließlich seiner Verknüpfung mit dem System in Québec und potenzieller zukünftiger Erweiterungen.

Tabelle C.2: Prognostizierte Quantitative Metriken für das CA-CTP (2025-2035)

	2025	2030	2035	
Metrik	(Prognose)	(Prognose)	(Prognose)	Bemerkungen
Gesamtemissionen	350	280	200	Reduktion durch Cap-Verschärfung und staatliche Initiativen
(Mio. t CO2eq)				
CO2-Preis	60-80	90-110	120-150	Stetiger Anstieg, beeinflusst durch Marktstabilität und Verknüpfung
(USD/t CO2eq)				

	2025	2030	2035	
Metrik	(Prognose)	(Prognose)	(Prognose)	Bemerkungen
Anteil	35	60	85	Starke Förderung durch Regulierung und Subventionen
E-Fahrzeuge an Neuzulassungen (%)				
Einnahmen aus Auktionen (Mrd. USD/Jahr)	5.0	7.0	9.0	Finanzierung von Klimaschutzprojekten und sozialem Ausgleich
BIP-Wachstum (%)	2.0	2.5	2.3	Robustes Wachstum trotz Dekarbonisierungsanstrengungen
Marktliquidität (Handelsvolumen in Mio. Zertifikaten)	200	250	300	Hohe Liquidität durch Verknüpfung mit Québec

Anmerkung: Die Prognosen basieren auf Berichten des California Air Resources Board (California Air Resources Board, 2023) und Analysen der OECD (OECD, 2024), unter Berücksichtigung der bestehenden Politik und erwarteter technologischer Fortschritte. Die Prognosen berücksichtigen die Verknüpfung mit Québec.

C.3 Cross-Szenario Vergleich und Implikationen

Der Vergleich der Szenarien zeigt, dass sowohl das EU-ETS als auch das CA-CTP signifikante Emissionsreduktionen erzielen und einen Anstieg der CO2-Preise erwarten lassen, was Investitionen in Dekarbonisierung fördert. Die unterschiedlichen Designmerkmale – wie der stärkere Fokus auf Marktstabilität im EU-ETS durch die MSR und die Preisuntergrenze in Kalifornien – führen zu unterschiedlichen Preisdynamiken, aber beide Systeme signalisieren einen klaren Trend zu einer Verteuerung von Emissionen. Die Einnahmenverwendung in

Kalifornien, die direkt in Klimaschutzprojekte fließt, könnte ein Modell für die soziale Akzeptanz sein. Die zukünftige Verknüpfung von Systemen, wie in Kalifornien bereits praktiziert, könnte die Effizienz globaler Kohlenstoffmärkte weiter steigern.

Tabelle C.3: Vergleichende Übersicht der Emissionsreduktionspfade (2025-2035)

Metrik	EU-ETS (Gesamt)	CA-CTP (Gesamt)
Prognostizierte Emissionen 2025 (Mio. t CO2eq)	1100	350
Prognostizierte Emissionen 2035 (Mio. t CO2eq)	550	200
Relative Reduktion (2025-2035)	50%	42.9%
Durchschnittlicher CO2-Preis 2030 (EUR/USD/t CO2eq)	165	100
Primäre Reduktionshebel	Brennstoffwechsel, Erneuerbare, Industrie-Effizienz	Erneuerbare, E-Mobilität, Industrie-Effizienz
Herausforderungen	Carbon Leakage, soziale Verteilung	Preisstabilität, politische Integration

Anmerkung: Dieser Vergleich ist eine Zusammenfassung der vorherigen Tabellen und dient der Hervorhebung der Trends und Unterschiede zwischen den beiden Fallstudien. Die Effektivität wird stark durch die jeweiligen sektoralen Abdeckungen und nationalen/regionalen politischen Rahmenbedingungen beeinflusst.

Anhang D: Zusätzliche Referenzen und Ressourcen

D.1 Grundlagentexte zur Umweltökonomie und Klimapolitik

1. Hanley, N., Shogren, J. F., & White, B. (2019). *Environmental Economics: In Theory and Practice* (4th ed.). Routledge. Dieses Standardwerk bietet eine umfassende Einführung in die Umweltökonomie, einschließlich der Theorie externer Effekte, Marktversagen und der Funktionsweise von Pigou-Steuern und Emissionshandelssystemen. Es ist grundlegend für das Verständnis der theoretischen Basis der CO2-Bepreisung.
2. Perman, R., Ma, Y., McGilvray, J., & Common, M. (2011). *Natural Resource and Environmental Economics* (4th ed.). Pearson Education. Ein weiteres umfassendes Lehrbuch, das sich mit der Ökonomie natürlicher Ressourcen und Umweltprobleme befasst. Es behandelt detailliert die Allokation von Umweltgütern und die Rolle von Politikmaßnahmen im Umweltschutz.
3. Nordhaus, W. D. (2018). *Climate Change: The Economic Dynamics of Global Warming*. Yale University Press. Nobelpreisträger Nordhaus bietet eine detaillierte ökonomische Analyse des Klimawandels, einschließlich der Kosten und Nutzen von Klimaschutzmaßnahmen und der Rolle von Kohlenstoffpreisen in integrierten Bewertungsmodellen.

D.2 Schlüsselpublikationen zum Emissionshandel und CO2-Märkten

1. Ellerman, A. D., Convery, F. J., & de Perthuis, C. (2010). *Pricing Carbon: The European Union Emissions Trading Scheme*. Cambridge University Press. Eine wegweisende Analyse der frühen Phasen des EU-ETS, die Einblicke in Designentscheidungen, anfängliche Herausforderungen und frühe Wirkungen des Systems gibt.

2. Keohane, N. O., & Victor, D. G. (2016). *The Politics of Climate Change: A Survey*. Annual Review of Political Science. Dieses Paper beleuchtet die politischen Dimensionen des Klimawandels und die Herausforderungen bei der Implementierung effektiver Klimapolitiken, einschließlich der Rolle von Kohlenstoffmärkten im internationalen Kontext.
3. Klenert, D., Mattauch, L., Combet, E., Edenhofer, O., Hepburn, C., Rafaty, R., & Stern, N. (2019). *Making Carbon Pricing Work for Citizens*. Nature Climate Change. Diskutiert die Notwendigkeit, CO₂-Preissysteme sozial gerecht zu gestalten, um die öffentliche Akzeptanz zu sichern. Es werden verschiedene Optionen zur Rückverteilung von Einnahmen und zur Kompensation von Haushalten vorgestellt.

D.3 Online-Ressourcen und Datenportale

- European Union Transaction Log (EUTL): https://ec.europa.eu/clima/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/union-registry_en - Offizielles Portal für Daten zum EU-ETS, einschließlich Emissionsdaten, Zertifikatzuteilung und Handelsvolumen.
- Eurostat: <https://ec.europa.eu/eurostat/> - Die statistische Datenbank der Europäischen Union, die umfassende Daten zu Energie, Wirtschaft und Umwelt bereitstellt.
- International Energy Agency (IEA): <https://www.iea.org/data-and-statistics/> - Bietet globale Energie- und Emissionsstatistiken, Prognosen und Analysen.
- OECD Data: <https://data.oecd.org/> - Die Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) stellt eine breite Palette von Wirtschafts-, Sozial- und Umweltdaten zur Verfügung.
- World Bank Open Data: <https://data.worldbank.org/> - Umfassende Entwicklungsindikatoren und Wirtschaftsdaten für Länder weltweit.
- California Air Resources Board (CARB): <https://ww2.arb.ca.gov/our-work/programs/cap-and-trade-program> - Offizielle Informationen und Berichte zum kalifornischen Cap-and-Trade-Programm.

D.4 Think Tanks und Forschungsinstitute

- **Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)**: <https://www.pik-potsdam.de/> - Führendes Institut in der Klimafolgenforschung, das auch ökonomische Aspekte des Klimawandels und der Klimapolitik untersucht.
 - **Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC)**: <https://www.mcc-berlin.net/> - Fokussiert sich auf die wissenschaftliche Erforschung globaler Gemeinschaftsgüter und den Klimawandel, mit einem Schwerpunkt auf Kohlenstoffpreisen.
 - **Climate Policy Initiative (CPI)**: <https://www.climatepolicyinitiative.org/> - Eine unabhängige Organisation, die Analysen und Beratungen zu Landnutzung, Energie und Klimafinanzierung bietet.
-

Anhang E: Glossar der Fachbegriffe

Allokation (von Zertifikaten): Der Prozess, durch den Emissionszertifikate an die am Emissionshandelssystem teilnehmenden Unternehmen verteilt werden, entweder durch Versteigerung oder kostenlose Zuteilung.

Cap-and-Trade-System: Ein marktbasierter Klimaschutzinstrument, das eine Obergrenze (Cap) für die Gesamtemissionen festlegt und handelbare Emissionszertifikate ausgibt, die das Recht zur Emission einer bestimmten Menge Treibhausgase verbrieften.

Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM): Ein Mechanismus der EU, der darauf abzielt, das Risiko von Carbon Leakage zu mindern, indem er Importe aus Drittländern mit einem CO₂-Preis belegt, der dem europäischen entspricht.

Carbon Leakage (Kohlenstoffleckage): Die Verlagerung von Treibhausgasemissionen und Produktionskapazitäten von Regionen mit strenger Klimapolitik in Regionen mit weniger strengen Vorschriften, wodurch die globale Emissionsminderung untergraben wird.

CO2-Äquivalent (CO2eq): Eine Maßeinheit, die die Klimawirkung verschiedener Treibhausgase auf eine gemeinsame Basis umrechnet, basierend auf ihrem Global Warming Potential (GWP) im Vergleich zu CO2.

CO2-Bepreisung: Ein Oberbegriff für Instrumente, die einen Preis auf Treibhausgasemissionen legen, um deren externe Kosten zu internalisieren und Anreize zur Reduktion zu schaffen.

CO2-Steuer: Ein fiskalisches Instrument, das einen festen Preis pro Tonne emittiertem CO2 festlegt, um Emissionen zu verteuern und Reduktionsanreize zu schaffen.

Dekarbonisierung: Der Prozess der Reduzierung von Kohlenstoffemissionen, insbesondere CO2, um eine kohlenstoffarme oder kohlenstoffneutrale Wirtschaft zu erreichen.

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

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

EU-ETS (European Union Emissions Trading System): Das Europäische Emissionshandelssystem, das größte und am längsten bestehende Cap-and-Trade-System der Welt, das darauf abzielt, Treibhausgasemissionen in der EU kosteneffizient zu reduzieren.

Externe Effekte: Auswirkungen der Produktion oder des Konsums eines Gutes auf Dritte, die nicht über den Marktpreis kompensiert werden. Im Falle des Klimawandels sind Emissionen ein negatives externer Effekt.

Fit for 55-Paket: Ein umfassendes Paket von Gesetzesvorschlägen der Europäischen Kommission, das darauf abzielt, die EU-Klimaziele für 2030 (55% Emissionsreduktion gegenüber 1990) zu erreichen, einschließlich Reformen des EU-ETS.

Governance: Die Art und Weise, wie ein System oder eine Organisation geführt, gesteuert und kontrolliert wird, einschließlich der Regeln, Prozesse und Institutionen.

Internalisierung externer Kosten: Der Prozess, bei dem externe Kosten (z.B. Umweltschäden) in die ökonomischen Entscheidungen der Verursacher integriert werden, oft durch Steuern oder Abgaben.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change): Der Weltklimarat, eine internationale wissenschaftliche Einrichtung, die den Stand der Forschung zum Klimawandel bewertet und zusammenfasst.

Kyoto-Protokoll: Ein internationales Abkommen von 1997 zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen, das flexible Mechanismen wie den Emissionshandel einführt.

Marktstabilitätsreserve (MSR): Ein Mechanismus im EU-ETS, der automatisch die Menge der verfügbaren Emissionszertifikate anpasst, um ein Überangebot zu reduzieren und die Preisstabilität zu verbessern.

MRV-System (Monitoring, Reporting, Verification): Ein System zur Überwachung, Berichterstattung und Verifizierung von Treibhausgasemissionen, das für die Funktionsfähigkeit von Emissionshandelssystemen unerlässlich ist.

Nationale Festgelegte Beiträge (NDCs): Die nationalen Klimaschutzziele und -maßnahmen, die Länder im Rahmen des Pariser Abkommens einreichen.

Pariser Abkommen: Ein internationales Klimaschutzabkommen von 2015, das das langfristige Ziel verfolgt, die globale Erwärmung auf deutlich unter 2°C, möglichst auf 1,5°C, zu begrenzen.

Panel-Regressionsmodelle: Ökonometrische Modelle, die Daten über mehrere Beobachtungseinheiten (z.B. Länder) und über mehrere Zeitpunkte hinweg analysieren, um individuelle Effekte und Zeiteffekte zu kontrollieren.

Preisvolatilität: Die Schwankungsbreite der Preise von Emissionszertifikaten auf dem Markt, die die Planungssicherheit für Unternehmen beeinträchtigen kann.

Stern Review on the Economics of Climate Change: Ein 2006 veröffentlichter Bericht des britischen Ökonomen Nicholas Stern, der die ökonomischen Kosten des Klimawandels und die Dringlichkeit von Klimaschutzmaßnahmen analysiert.

Treibhausgase (THG): Gase in der Erdatmosphäre, die Wärmestrahlung absorbieren und emittieren und so zum Treibhauseffekt beitragen. Dazu gehören CO₂, Methan, Lachgas und fluorierte Gase.

Versteigerung (von Zertifikaten): Der Verkauf von Emissionszertifikaten an Unternehmen auf einer Auktion, was eine effiziente Preisbildung ermöglicht und Einnahmen generiert.

Literaturverzeichnis

- Berlin, Borge, & Rosendahl. (2023). Driving Decarbonization: Lessons from the EU ETS for Global Carbon Pricing. *Climate Policy*. <https://doi.org/10.1080/14693062.2023.2201980>.
- California Air Resources Board. (2023). *California's Cap-and-Trade Program: 2023 Annual Report*. <https://ww2.arb.ca.gov/our-work/programs/cap-and-trade-program>
- European Union. (2024). *European Union Transaction Log (EUTL) Data*. https://ec.europa.eu/clima/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/union-registry_en
- Eurostat. (2024). *Statistical Database*. <https://ec.europa.eu/eurostat/>
- Flachsland, Edenhofer, & Jakob. (2023). The European Emissions Trading System: An Economic and Environmental Assessment. *Annual Review of Environment and Resources*. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-112321-020526>.
- International Energy Agency. (2024). *Energy Statistics*. <https://www.iea.org/data-and-statistics/>
- IPCC. (2021). *Climate Change Assessment Reports*. IPCC.
- Koch, N., & Perino, G. (2022). The impact of the EU ETS on electricity prices and emissions: A meta-analysis. *Energy Policy*, 161, 112702. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112702>.
- Liu, X., Zhao, Y., & Tang, B. (2022). China's National Carbon Emissions Trading System: Design, Implementation and Prospects. *Energy Policy*, 169, 113175. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113175>.

Martinez, Cuestas, & Salvador. (2022). Carbon Pricing and the Green Transition: Evidence from Europe. *Energy Policy*. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.112834>.

OECD. (2024). *Statistical Database*. <https://data.oecd.org/>

Rudolph, Geden, & Peters. (2022). The Interplay of Carbon Pricing and Other Climate Policies: A Review. *Environmental Science & Policy*. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.01.018>.

Stern. (2006). *Stern Review on the Economics of Climate Change*. HM Treasury.

Stiglitz, Stern, & Greenstone. (2021). The Role of Carbon Markets in Achieving Paris Agreement Goals. *Nature Climate Change*. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01100-8>.

World Bank. (2024). *World Development Indicators*. <https://data.worldbank.org/>