

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

KI-generierte akademische Abschlussarbeit als Showcase

Academic Thesis AI (Multi-Agenten-System)

Januar 2025

Table of Contents

Abstract	1
Einleitung	3
2. Literaturübersicht	4
Inhalt	4
2.1 Geschichte des Emissionshandels und internationale Klimapolitik	5
2.2 Theoretische Grundlagen der Umweltökonomie	9
2.3 CO ₂ -Preismechanismen und Klimaschutz	11
2.4 Empirische Studien zur Wirksamkeit von Emissionshandelssystemen	13
2.5 Kritische Perspektiven und Herausforderungen	19
2.6 Fazit und Forschungslücken	22
2.7 Vergleich der Emissionshandelssysteme (ETS)	23
3. Methodik	25
Inhalt	25
3.1 Forschungsdesign	25
3.2 Analyserahmen für die Klimaschutzwirkung	26
3.3 Auswahl der Fallstudien	28
3.4 Datenerhebung und Datenquellen	30
3.5 Messverfahren und Operationalisierung der Variablen	31
3.6 Statistische Methoden zur Wirksamkeitsanalyse	33
3.7 Limitationen der Methodik	36
3.8 Analyserahmen für die Klimaschutzwirkung	37
2. Analyse	39
Inhalt	39
2.1 Emissionsreduktionen durch CO ₂ -Handel	39
2.1.1 Mechanismen der Emissionsreduktion durch ETS	43
2.2 Preisgestaltung und Marktmechanismen	44

2.3 Fallstudien (EU ETS, Kalifornien, China)	47
2.4 Vergleich mit anderen Klimaschutzinstrumenten	54
2.5 Empirische Belege für Klimaschutzwirkung	57
Diskussion	62
Inhalt	62
Implikationen für Klimapolitik	63
Grenzen und Herausforderungen des Emissionshandels	65
Verbesserungsvorschläge für CO ₂ -Märkte	67
Rolle im globalen Klimaschutz	69
Empfehlungen für Politik und Wirtschaft	72
6. Einschränkungen	75
Methodische Einschränkungen	75
Umfang und Generalisierbarkeit	76
Zeitliche und Kontextuelle Beschränkungen	76
Theoretische und konzeptionelle Einschränkungen	77
7. Zukünftige Forschungsrichtungen	77
1. Empirische Validierung und Langzeitanalyse aktueller ETS-Reformen	78
2. Auswirkungen der ETS-Ausweitung auf neue Sektoren und soziale Gerechtigkeit	78
3. Effektivität und Implementierungsherausforderungen von Carbon Border Adjustment Mechanisms (CBAM)	78
4. Interaktion von Kohlenstoffpreisen mit anderen Klimapolitiken	79
5. Technologische Innovation und ETS-Anreize	79
6. Globale Vernetzung von Kohlenstoffmärkten und Artikel 6 des Pariser Abkommens	80
7. Resilienz von ETS gegenüber geopolitischen und wirtschaftlichen Schocks	80
8. Schlussfolgerung	80

Inhalt	81
Anhang A: Detailliertes Rahmenwerk zur Bewertung der Klimaschutzwirkung von ETS	84
A.1 Theoretische Fundierung und Dimensionen der Wirkung	84
A.2 Innovations- und Technologieeffekte	85
A.3 Verteilungs- und Wettbewerbseffekte	86
A.4 Governance und Designmerkmale	86
A.5 Interaktion mit anderen Politiken und internationaler Kontext	87
Anhang C: Detaillierte Fallstudien-Daten und Szenarien	87
C.1 Szenario 1: Entwicklung der EU ETS Emissionen und Preise	87
C.2 Szenario 2: Projektion der Emissionsreduktion im EU ETS bis 2030 . . .	88
C.3 Szenario 3: Vergleich der Kosteneffizienz verschiedener Dekarbonisierungs- maßnahmen	89
C.4 Szenario 4: Verteilungswirkungen von CO2-Preisen auf Haushalte	90
Anhang D: Zusätzliche Referenzen und Ressourcen	91
D.1 Grundlagenwerke und Überblicksliteratur	92
D.2 Schlüsselpapiere zum Emissionshandel und zur Klimapolitik	92
D.3 Online-Ressourcen und Datenbanken	93
D.4 Fachzeitschriften und Publikationsreihen	94
D.5 Professionelle Organisationen und Think Tanks	95
Anhang E: Glossar der Fachbegriffe	95
Verwendete Zitate	99
Zhao, J.-L., Guo, X., & Li, Y.-F. (2022). Does carbon emission trading scheme promote green innovation? Evidence from China. <i>Journal of Environmental Management</i> , 302, 113941.	102

Abstract

Forschungsproblem und Ansatz: Die globale Klimakrise erfordert effektive politische und ökonomische Instrumente zur Reduktion von Treibhausgasemissionen. Diese Arbeit untersucht die Rolle von Emissionshandelssystemen (ETS), insbesondere des EU-ETS, bei der Verlangsamung des menschengemachten Klimawandels. Es wird analysiert, inwieweit diese marktbasierteren Ansätze nachweislich zu signifikanten Emissionsreduktionen führen und welche Faktoren ihre Wirksamkeit beeinflussen.

Methodik und Ergebnisse: Mittels einer komparativen Fallstudienanalyse, ergänzt durch quantitative Wirksamkeitsanalysen, wurden das EU-ETS sowie die Systeme in Kalifornien und China untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass gut konzipierte ETS signifikante Emissionsreduktionen erzielen können, insbesondere wenn sie von ambitionierten Obergrenzen und robusten Marktstabilitätsmechanismen begleitet werden. Die Analyse hebt die Bedeutung eines stabilen CO₂-Preissignals für langfristige Investitionsanreize hervor.

Wesentliche Beiträge: Die Arbeit leistet drei primäre Beiträge: (1) Eine aktualisierte empirische Bewertung der Wirksamkeit des EU-ETS unter Berücksichtigung jüngster Reformen, (2) eine vertiefte Analyse der Herausforderungen und Grenzen von ETS, insbesondere im Hinblick auf Carbon Leakage und Verteilungseffekte, und (3) die Formulierung konkreter Verbesserungsvorschläge für CO₂-Märkte sowie evidenzbasierter Empfehlungen für Politik und Wirtschaft.

Implikationen: Die Ergebnisse unterstreichen die Notwendigkeit eines integrativen Politikansatzes, der ETS als zentrales Instrument nutzt, aber durch flankierende Maßnahmen ergänzt, um ökonomische Effizienz mit sozialer Gerechtigkeit und ökologischer Nachhaltigkeit zu verbinden. Für die Politik ergeben sich Empfehlungen zur Stärkung von Marktstabilität und zur Erweiterung des Anwendungsbereichs, während Unternehmen zur proaktiven Entwicklung von Dekarbonisierungsstrategien angehalten werden.

Schlüsselwörter: Emissionshandel, CO2-Zertifikate, Klimawandel, EU-ETS, Klimapolitik, Carbon Pricing, Treibhausgasemissionen, Marktmechanismen, Nachhaltigkeit, Dekarbonisierung, Carbon Leakage, Marktstabilitätsreserve, Umweltökonomie, Klimaschutzinstrumente, Emissionsreduktion.

Einleitung

Die globale Klimakrise gehört zu den drängendsten und komplexesten Herausforderungen des 21. Jahrhunderts. Ihr Ausmaß und ihre Dringlichkeit sind in der Wissenschaft – und zunehmend auch in der breiten Öffentlichkeit – unbestritten. Seit Beginn der Industrialisierung hat die vom Menschen verursachte Freisetzung von Treibhausgasen, insbesondere Kohlendioxid (CO₂), zu einem erheblichen Anstieg der globalen Durchschnittstemperaturen geführt. Diese Entwicklung zieht weitreichende, oft irreversible Konsequenzen für natürliche Ökosysteme, die menschliche Gesellschaft und die Weltwirtschaft nach sich.

Der Zwischenstaatliche Ausschuss für Klimawandel (IPCC) hat in seinen wissenschaftlichen Berichten wiederholt die Notwendigkeit einer drastischen Emissionsreduktion betont. Um die schwerwiegendsten Folgen abzuwenden, muss die Erwärmung auf deutlich unter 2°C, idealerweise sogar 1,5°C, gegenüber dem vorindustriellen Niveau begrenzt werden (Core Writing Team et al., 2023). Diese globale Herausforderung verlangt abgestimmtes Handeln auf internationaler, nationaler und lokaler Ebene. Zudem braucht es wirksame politische und ökonomische Instrumente, die Anreize für eine umfassende Dekarbonisierung schaffen und den Übergang zu einer nachhaltigen, kohlenstoffarmen Wirtschaft beschleunigen.

Die Auswirkungen des Klimawandels zeigen sich bereits heute in vielfältiger Form. Gletscher und Polkappen schmelzen, was den Meeresspiegelanstieg beschleunigt; wir erleben extreme Wetterereignisse wie Hitzewellen, Dürren, Überschwemmungen und Stürme. Auch die biologische Vielfalt und die globale Ernährungssicherheit sind massiv bedroht (IPCC Core Writing Team et al., 2023). Diese Phänomene sind nicht nur ökologisch verheerend; sie haben auch tiefgreifende sozioökonomische Konsequenzen, die von Migration und Konflikten bis hin zu erheblichen wirtschaftlichen Schäden reichen.

2. Literaturübersicht

Abschnitt: Literaturübersicht **Wortzahl:** 7,331 **Status:** Entwurf v1

Inhalt

Die Notwendigkeit, den Klimawandel zu bekämpfen und die globalen Treibhausgasemissionen (THG) zu reduzieren, hat in den letzten Jahrzehnten erheblich an Dringlichkeit gewonnen [MISSING: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023 - Sixth Assessment Report]. Als Reaktion darauf wurden verschiedene politische Instrumente entwickelt und implementiert, um Anreize für eine Dekarbonisierung der Wirtschaft zu schaffen. Unter diesen Instrumenten nimmt der Emissionshandel, insbesondere in Form von Cap-and-Trade-Systemen, eine zentrale Rolle ein. Diese Literaturübersicht zielt darauf ab, die bestehende Forschung zu den theoretischen Grundlagen, der historischen Entwicklung, der empirischen Wirksamkeit und den kritischen Herausforderungen von CO₂-Preismechanismen und Emissionshandelssystemen zu synthetisieren. Dabei wird ein besonderer Fokus auf das Europäische Emissionshandelssystem (EU ETS) gelegt, das als das größte und am längsten etablierte Kohlenstoffmarktsystem der Welt gilt (Flachsland et al., 2017). Die Analyse umfasst die Entwicklung von internationalen Abkommen wie dem Kyoto-Protokoll bis hin zu nationalen und regionalen Initiativen, die darauf abzielen, eine effiziente und kostengünstige Emissionsreduktion zu fördern.

Die Diskussion über CO₂-Preismechanismen ist tief in der Umweltökonomie verwurzelt, die sich mit der Allokation knapper Umweltressourcen und der Internalisierung externer Kosten befasst (William J. Baumol & Wallace E. Oates, 1988). Der Emissionshandel wird als marktbasierter Ansatz angesehen, der es ermöglicht, die Reduktionslast dort zu platzieren, wo die Kosten am geringsten sind, was zu einer gesamtwirtschaftlich effizienten Lösung führen soll. Dennoch sind die Implementierung und die tatsächliche Wirk-

samkeit solcher Systeme komplex und von einer Vielzahl von Faktoren abhängig, darunter Designmerkmale, politische Rahmenbedingungen und globale wirtschaftliche Entwicklungen. Diese Übersicht wird die Beiträge führender Wissenschaftler auf diesem Gebiet beleuchten und dabei sowohl Erfolge als auch Misserfolge sowie die anhaltenden Debatten über die optimale Gestaltung und Anwendung von Kohlenstoffmärkten hervorheben. Die begrenzte Anzahl an verfügbaren vollständigen Zitationen erfordert hierbei eine Synthese der bereitgestellten Forschungszusammenfassungen und eine umfassende Darstellung des allgemeinen Wissensstands in den relevanten Themengebieten, um die Tiefe der Analyse zu gewährleisten.

2.1 Geschichte des Emissionshandels und internationale Klimapolitik

Die Idee des Emissionshandels als Instrument zur Umweltregulierung hat ihre Wurzeln in den 1960er und 1970er Jahren, wurde aber erst mit dem Aufkommen globaler Umweltprobleme wie dem Klimawandel zu einem zentralen Element der internationalen Klimapolitik (Tom Tietenberg & Lynne Lewis, 2018). Die Notwendigkeit, ein globales Problem zu lösen, das durch die Emissionen zahlreicher souveräner Staaten verursacht wird, führte zur Entwicklung komplexer internationaler Abkommen.

2.1.1 Das Kyoto-Protokoll und seine Mechanismen Ein Wendepunkt in der internationalen Klimapolitik war das Kyoto-Protokoll, das 1997 verabschiedet wurde und 2005 in Kraft trat [MISSING: UNFCCC, 1997 - Kyoto Protocol]. Dieses Protokoll verpflichtete Industrieländer zu quantifizierten Emissionsreduktionszielen und führte eine Reihe von “flexiblen Mechanismen” ein, die es den Vertragsparteien ermöglichen sollten, ihre Verpflichtungen kostengünstiger zu erfüllen. Zu diesen Mechanismen gehörten der internationale Emissionshandel (International Emissions Trading, IET), der Mechanismus für umweltverträgliche Entwicklung (Clean Development Mechanism, CDM) und die gemeinsame Umsetzung (Joint Implementation, JI). Der internationale Emissionshandel ermöglichte es Ländern mit über-

schüssigen Emissionsrechten (Assigned Amount Units, AAUs), diese an Länder zu verkaufen, die Schwierigkeiten hatten, ihre Ziele zu erreichen.

Aldy und Stavins (2007) untersuchen in ihrer Arbeit “Architectures for an International Global Warming Agreement: Lessons from the Kyoto Protocol” die Struktur und Wirksamkeit internationaler Klimaabkommen und ziehen dabei Lehren aus dem Kyoto-Protokoll (Joseph E. Aldy & Richard N. Stavins, 2007). Sie analysieren, wie verschiedene Designmerkmale, wie die Festlegung von Emissionszielen, die Einbeziehung flexibler Mechanismen und die Durchsetzungsmechanismen, die Effektivität und Effizienz solcher Abkommen beeinflussen. Ihre Forschung betont die Bedeutung von Flexibilität bei der Erreichung von Emissionsreduktionszielen, da dies die Gesamtkosten senken und die Akzeptanz von Klimaschutzmaßnahmen erhöhen kann. Das Kyoto-Protokoll versuchte, diese Flexibilität durch die Einführung von handelbaren Emissionsrechten zu gewährleisten, was jedoch aufgrund verschiedener Faktoren, einschließlich der Nichtratifizierung durch Schlüsselakteure wie die Vereinigten Staaten und der Herausforderung, faire und effektive Ziele festzulegen, nur begrenzt erfolgreich war. Die Erfahrungen mit dem Kyoto-Protokoll zeigten, dass die Schaffung eines funktionierenden globalen Kohlenstoffmarktes erhebliche politische und technische Hürden mit sich bringt, insbesondere im Hinblick auf die Festlegung von Basislinien, die Überwachung, Berichterstattung und Verifizierung (MRV) von Emissionen sowie die Verteilung der Lasten zwischen entwickelten und sich entwickelnden Ländern. Die Arbeit von Aldy und Stavins (2007) liefert wertvolle Einblicke in die Komplexität der Gestaltung internationaler Klimaarchitekturen und unterstreicht die Notwendigkeit von Pragmatismus und Anpassungsfähigkeit. Die Lehren aus Kyoto haben die nachfolgenden Verhandlungen und die Entwicklung des Pariser Abkommens maßgeblich beeinflusst, das einen Bottom-up-Ansatz mit national festgelegten Beiträgen (NDCs) verfolgt, anstatt top-down-Ziele festzulegen.

2.1.2 Das Europäische Emissionshandelssystem (EU ETS) Als Pionier und bis heute größtes Emissionshandelssystem der Welt wurde das EU ETS 2005 als ein zentrales

Instrument zur Erreichung der Klimaziele der Europäischen Union eingeführt (Flachsland et al., 2017). Es deckt derzeit rund 40 % der THG-Emissionen der EU ab, hauptsächlich aus der Stromerzeugung, energieintensiven Industrien und dem innerstaatlichen Flugverkehr (Flachsland et al., 2017). Das System arbeitet nach dem Cap-and-Trade-Prinzip, bei dem eine Obergrenze (Cap) für die gesamten Emissionen festgelegt wird, die von den erfassten Anlagen ausgestoßen werden dürfen. Innerhalb dieser Obergrenze werden Emissionszertifikate ausgegeben, die von den Unternehmen gekauft und gehandelt werden können. Jedes Zertifikat berechtigt zur Emission einer Tonne CO₂-Äquivalent.

Flachsland, Edenhofer und Jakob (2017) bieten in ihrer umfassenden Analyse “The European Emissions Trading System: A decade of experience” eine detaillierte Untersuchung der Leistung, Designmerkmale und Entwicklung des EU ETS in seinen ersten zehn Jahren (Flachsland et al., 2017). Die Autoren beleuchten die verschiedenen Phasen des Systems und die evolutionären Anpassungen, die vorgenommen wurden, um auf Herausforderungen und Marktineffizienzen zu reagieren. Die erste Phase (2005-2007) diente primär als “Lernphase” und war durch eine Überallokation von Zertifikaten gekennzeichnet, was zu einem Preisverfall auf nahezu Null führte. Diese frühe Erfahrung zeigte die Schwierigkeiten bei der präzisen Festlegung des Caps und der Verteilung der Zertifikate. In der zweiten Phase (2008-2012), die mit dem ersten Verpflichtungszeitraum des Kyoto-Protokolls zusammenfiel, wurden einige Anpassungen vorgenommen, aber die globale Finanzkrise von 2008 führte erneut zu einem erheblichen Überschuss an Zertifikaten und einem anhaltend niedrigen Kohlenstoffpreis.

Die dritte Phase (2013-2020) brachte wesentliche Reformen mit sich, darunter eine EU-weite Harmonisierung der Zuteilungsregeln, eine verstärkte Versteigerung von Zertifikaten anstelle der kostenlosen Zuteilung und die Einführung eines linearen Reduktionsfaktors für das Cap. Trotz dieser Reformen blieb der Preisdruck aufgrund des weiterhin bestehenden Überschusses und externer Faktoren wie der Wirtschaftskrise und dem Ausbau erneuerbarer Energien bestehen. Flachsland et al. (2017) betonen, dass das EU ETS zwar eine wichtige Rolle bei der Sensibilisierung für Kohlenstoffkosten gespielt hat, seine Wirksamkeit bei

der Anreizsetzung für tiefgreifende Emissionsreduktionen durch den niedrigen Preis jedoch eingeschränkt war (Flachsland et al., 2017). Die Studie hebt hervor, dass die politische Steuerung und die Fähigkeit, das System an veränderte Marktbedingungen anzupassen, entscheidend für den Erfolg sind. Die Analyse von Flachsland et al. (2017) zeigt, dass das EU ETS ein dynamisches Policy-Instrument ist, das kontinuierlich weiterentwickelt werden muss, um seine Klimaschutzziele effektiv zu erreichen (Flachsland et al., 2017). Die Erfahrungen des EU ETS sind von unschätzbarem Wert für andere Regionen und Länder, die eigene Emissionshandelssysteme entwickeln oder bestehende verbessern möchten, und bieten eine reiche Quelle für empirische Forschung zu Designfragen und politischen Herausforderungen.

Ellerman, Convery und de Perthuis (2010) ergänzen diese Perspektive mit ihrer Arbeit “Pricing Carbon: The European Union Emissions Trading Scheme”, die sich auf die Preisbildung von Kohlenstoff im EU ETS konzentriert (Denny A. Ellerman et al., 2010). Sie analysieren die Faktoren, die den Kohlenstoffpreis im System beeinflusst haben, einschließlich der politischen Entscheidungen bezüglich des Caps, der freien Zuteilung und der Marktmechanismen. Ihre Forschung unterstreicht die Bedeutung eines robusten und glaubwürdigen Preissignals, um Investitionen in kohlenstoffarme Technologien zu lenken und Verhaltensänderungen zu fördern. Die Autoren betonen, dass die Preisvolatilität und die Unsicherheit über zukünftige politische Maßnahmen die Effektivität des Preissignals beeinträchtigen können, was langfristige Investitionsentscheidungen erschwert. Die Studie von Ellerman et al. (2010) liefert wichtige Erkenntnisse darüber, wie das Design des Systems, insbesondere die Festlegung des Caps und die Flexibilität bei der Nutzung von externen Gutschriften, den Markt und die Preisbildung beeinflusst (Denny A. Ellerman et al., 2010). Die Erkenntnisse aus diesen frühen Phasen des EU ETS waren entscheidend für die nachfolgenden Reformen, die darauf abzielten, den Zertifikatsüberschuss zu reduzieren und das Preissignal zu stärken, um die ambitionierten Klimaziele der EU zu erreichen.

2.2 Theoretische Grundlagen der Umweltökonomie

Die theoretischen Fundamente des Emissionshandels sind tief in der Umweltökonomie verankert, einem Teilgebiet der Ökonomie, das sich mit der Beziehung zwischen Wirtschaft und Umwelt befasst (Nick Hanley et al., 2019). Sie bietet den konzeptionellen Rahmen, um Umweltprobleme als Fälle von Marktversagen zu verstehen und politische Instrumente zu entwickeln, die diese Versagen korrigieren.

2.2.1 Externe Effekte und Pigou-Steuer Das zentrale Konzept, das dem Emissionshandel zugrunde liegt, ist das der externen Effekte. Externe Effekte treten auf, wenn die Produktion oder der Konsum eines Gutes direkte Auswirkungen auf Dritte hat, die nicht am Marktgeschehen beteiligt sind und für die keine Kompensation gezahlt wird (Arthur Cecil Pigou, 1920). Im Kontext des Klimawandels sind die Emissionen von Treibhausgasen ein klassisches Beispiel für eine negative externe Externalität. Die Kosten der Klimafolgen – wie Extremwetterereignisse, Meeresspiegelanstieg oder Ernteausfälle – werden nicht von den Emittenten getragen, sondern von der Gesellschaft als Ganzes. Dies führt dazu, dass Unternehmen und Konsumenten Anreize haben, mehr zu emittieren, als es unter Berücksichtigung der gesellschaftlichen Kosten optimal wäre, was zu einer Überproduktion von Emissionen führt.

Arthur Pigou schlug bereits im frühen 20. Jahrhundert vor, externe Kosten durch Steuern (Pigou-Steuern) zu internalisieren (Arthur Cecil Pigou, 1920). Eine Pigou-Steuer auf CO₂-Emissionen würde die Emittenten dazu zwingen, die sozialen Kosten ihrer Emissionen zu tragen, wodurch der Marktpreis die tatsächlichen gesellschaftlichen Kosten widerspiegeln würde. Dies würde Anreize schaffen, Emissionen zu reduzieren, bis die Grenzkosten der Reduktion den Steuersatz erreichen. Obwohl die Pigou-Steuer theoretisch effizient ist, ist ihre praktische Umsetzung aufgrund der Schwierigkeit, die “richtige” Höhe der Steuer – die den Grenzkosten des Schadens entspricht – zu bestimmen, oft komplex. Eine zu niedrige Steuer würde nicht ausreichen, um die Emissionen ausreichend zu reduzieren, während eine zu hohe Steuer die Wirtschaft unnötig belasten könnte.

2.2.2 Cap-and-Trade-Systeme als marktwirtschaftliches Instrument Der Emissionshandel, insbesondere in Form von Cap-and-Trade-Systemen, bietet eine alternative marktwirtschaftliche Lösung zur Internalisierung externer Kosten (Ronald H. Coase, 1960). Anstatt einen Preis (Steuer) festzulegen und die Menge der Emissionen dem Markt zu überlassen, wird beim Cap-and-Trade die Gesamtmenge der zulässigen Emissionen (das Cap) festgelegt. Innerhalb dieses Caps werden Emissionsrechte (Zertifikate) geschaffen, die gehandelt werden können. Unternehmen, die ihre Emissionen kostengünstiger reduzieren können, verkaufen überschüssige Zertifikate an Unternehmen, für die Reduktionen teurer wären. Dieser Handel führt dazu, dass die Emissionsreduktionen dort erfolgen, wo sie am günstigsten sind, und stellt sicher, dass das vorgegebene Emissionsziel (das Cap) erreicht wird.

Der Vorteil des Cap-and-Trade-Systems liegt in seiner Kosteneffizienz und der Gewissheit über die erzielte Emissionsmenge. Im Gegensatz zur Pigou-Steuer, bei der die Höhe der Emissionsreduktion unsicher ist, garantiert das Cap-and-Trade-System die Einhaltung eines bestimmten Emissionsziels. Der Markt bestimmt den Preis für die Emissionen, der sich aus Angebot und Nachfrage nach Zertifikaten ergibt. Dieser dynamische Preismechanismus sendet ein klares Signal an die Unternehmen, in emissionsarme Technologien und Prozesse zu investieren. Die theoretische Grundlage für die Effizienz des Handels mit Umweltrechten wurde maßgeblich von Ronald Coase mit seinem Theorem über die Allokation von Eigentumsrechten gelegt (Ronald H. Coase, 1960). Er zeigte, dass unter bestimmten Bedingungen (insbesondere geringen Transaktionskosten) eine effiziente Allokation von Ressourcen unabhängig von der ursprünglichen Verteilung der Eigentumsrechte erreicht wird, wenn diese Rechte klar definiert und handelbar sind. Im Kontext des Emissionshandels bedeutet dies, dass die anfängliche Zuteilung der Zertifikate (kostenlos oder durch Versteigerung) zwar Verteilungseffekte hat, aber die Kosteneffizienz der Emissionsreduktion nicht beeinträchtigt, solange die Zertifikate frei gehandelt werden können.

2.3 CO₂-Preismechanismen und Klimaschutz

Die Implementierung von CO₂-Preismechanismen ist eine Schlüsselstrategie im globalen Klimaschutz. Sie zwingen Emittenten, die Kosten ihrer Treibhausgasemissionen zu tragen, wodurch Anreize für emissionsmindernde Investitionen und Innovationen geschaffen werden. Neben dem Cap-and-Trade-System existieren auch andere Ansätze zur CO₂-Bepreisung.

2.3.1 Arten von CO₂-Preismechanismen Grundsätzlich lassen sich CO₂-Preismechanismen in zwei Hauptkategorien einteilen: Emissionshandelssysteme (ETS) und CO₂-Steuern. Wie bereits erwähnt, legt ein ETS eine Obergrenze für die Gesamtemissionen fest und lässt den Markt den Preis für die Emissionen bestimmen. Im Gegensatz dazu legt eine CO₂-Steuer direkt einen Preis pro Tonne CO₂-Äquivalent fest, während die resultierende Emissionsmenge dem Markt überlassen wird [MISSING: Metcalf & Weisbach, 2012 - The Design of a Carbon Tax]. Beide Mechanismen haben das Potenzial, Emissionen zu reduzieren, unterscheiden sich jedoch in ihren Eigenschaften und Implikationen.

CO₂-Steuern bieten eine größere Preissicherheit für Unternehmen, was Investitionsentscheidungen erleichtern kann. Sie können auch einfacher zu implementieren sein als komplexe ETS-Systeme, da sie in bestehende Steuersysteme integriert werden können. Allerdings ist die ökologische Wirksamkeit einer CO₂-Steuer weniger vorhersehbar, da die tatsächliche Emissionsreduktion von der Preiselastizität der Nachfrage abhängt. Emissionshandelssysteme bieten dagegen eine höhere Sicherheit bei der Erreichung eines bestimmten Emissionsziels, da die Gesamtmenge der Emissionen durch das Cap begrenzt ist. Dies geht jedoch oft mit einer höheren Preisvolatilität einher, die für Unternehmen Unsicherheit schaffen kann (Kenneth A. Pizer, 2002).

Fischer und Salant (2021) untersuchen in ihrer Arbeit “Carbon Pricing and the Timing of Emissions Reductions” die Auswirkungen von CO₂-Preismechanismen auf den Zeitpunkt von Emissionsreduktionen (Carolyn Fischer & Stephen W. Salant, 2021). Sie analysieren, wie verschiedene Designmerkmale von Kohlenstoffmärkten, wie die Stabilität des Kohlenstoff-

preises, die Erwartungen an zukünftige politische Maßnahmen und die Verfügbarkeit von Offsets oder Banking-Optionen, die Investitionsentscheidungen von Unternehmen beeinflussen. Ihre Forschung zeigt, dass ein glaubwürdiges und langfristig stabiles Preissignal entscheidend ist, um frühzeitige und umfassende Investitionen in emissionsarme Technologien anzureizen. Preisvolatilität und Unsicherheit können dazu führen, dass Unternehmen Reduktionen aufschieben oder in weniger effektive Maßnahmen investieren. Die Studie unterstreicht die Notwendigkeit, das Design von CO₂-Preismechanismen so zu gestalten, dass es klare und konsistente Anreize für die Dekarbonisierung über längere Zeiträume hinweg bietet. Dies beinhaltet Mechanismen zur Preisstabilisierung, wie einen Mindestpreis (price floor) oder einen Reservestabilitätsmechanismus (Market Stability Reserve, MSR), wie er im EU ETS implementiert wurde, um übermäßige Zertifikatsüberschüsse abzubauen (Flachsland et al., 2017).

2.3.2 Rolle von Kohlenstoffmärkten im Klimaschutz Kohlenstoffmärkte spielen eine vielfältige Rolle im Klimaschutz, die über die reine Emissionsreduktion hinausgeht. Sie fördern Innovationen, mobilisieren Finanzmittel und können zur internationalen Zusammenarbeit beitragen. Durch das Setzen eines Preises auf Kohlenstoff schaffen sie einen direkten Anreiz für Unternehmen, in Forschung und Entwicklung (F&E) für kohlenstoffarme Technologien zu investieren (Adam B. Jaffe et al., 2005). Der Kohlenstoffpreis kann die Rentabilität von Investitionen in erneuerbare Energien, Energieeffizienz und Kohlenstoffabscheidung und -speicherung (CCS) erhöhen.

Darüber hinaus können Kohlenstoffmärkte erhebliche Einnahmen generieren, insbesondere wenn Zertifikate versteigert werden. Diese Einnahmen können zur Finanzierung weiterer Klimaschutzmaßnahmen, zur Unterstützung von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel oder zur Entlastung von Haushalten und Unternehmen verwendet werden, die von den Kohlenstoffkosten betroffen sind. Die Allokation dieser Einnahmen ist eine wichtige politische Entscheidung, die die Verteilungswirkungen des Systems beeinflusst.

Stavins (2019) befasst sich in “The Future of U.S. Climate Policy: A Way Forward” mit der Notwendigkeit einer effektiven Klimapolitik in den Vereinigten Staaten und erörtert verschiedene politische Instrumente, einschließlich Kohlenstoffpreismechanismen (Robert N. Stavins, 2019). Seine Arbeit betont die Bedeutung der Integration von Kohlenstoffpreisen in einen umfassenderen Politikmix, der auch Regulierungen, Subventionen für Forschung und Entwicklung sowie internationale Kooperation umfasst. Er argumentiert, dass ein gut gestalteter Kohlenstoffpreis das effizienteste Mittel zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen ist, aber dass politische Realitäten und Verteilungseffekte oft die Implementierung erschweren. Stavins (2019) hebt hervor, dass die Gestaltung eines Kohlenstoffpreissystems Kompromisse zwischen Effizienz, Verteilungsgerechtigkeit und politischer Machbarkeit erfordert (Robert N. Stavins, 2019). Seine Analyse ist besonders relevant für Länder, die noch keinen nationalen Kohlenstoffpreis eingeführt haben, und bietet Leitlinien für die Überwindung politischer Blockaden und die Entwicklung einer wirksamen Klimastrategie. Die Integration von Kohlenstoffmärkten in nationale und internationale Klimaschutzstrategien ist somit ein komplexes Unterfangen, das sowohl ökonomische Effizienzüberlegungen als auch politische und soziale Faktoren berücksichtigen muss.

2.4 Empirische Studien zur Wirksamkeit von Emissionshandelssystemen

Die theoretischen Vorteile von Emissionshandelssystemen müssen sich in der Praxis bewähren. Eine Vielzahl empirischer Studien hat die Wirksamkeit von ETS-Systemen, insbesondere des EU ETS, bei der Reduzierung von Emissionen und der Förderung von Innovationen untersucht.

2.4.1 Wirksamkeit des EU ETS: Erkenntnisse aus “A decade of experience”

Die detaillierte Analyse von Flachsland, Edenhofer und Jakob (2017) zum Europäischen Emissionshandelssystem (EU ETS) bietet umfassende Einblicke in dessen Wirksamkeit über ein Jahrzehnt hinweg (Flachsland et al., 2017). Die Autoren stellen fest, dass das EU ETS zwar

eine wichtige Rolle bei der Etablierung eines Kohlenstoffpreises und der Sensibilisierung der Industrie für die Kosten von Emissionen gespielt hat, seine tatsächliche Fähigkeit, signifikante Emissionsreduktionen über die bereits durch andere Faktoren (wie die Wirtschaftskrise oder den Ausbau erneuerbarer Energien) verursachten hinaus zu bewirken, in den ersten Phasen begrenzt war. Ein zentrales Problem war der persistente Überschuss an Emissionszertifikaten, der zu niedrigen und volatilen Kohlenstoffpreisen führte. Dieser Überschuss entstand durch eine Kombination aus großzügiger anfänglicher Zuteilung, der Wirtschaftskrise, die die Nachfrage nach Zertifikaten reduzierte, und dem Zustrom von internationalen Gutschriften (CDM/JI).

Trotz dieser Herausforderungen betonen Flachsland et al. (2017), dass das System wichtige Lernprozesse angestoßen hat und in späteren Phasen durch Reformen gestärkt wurde (Flachsland et al., 2017). Insbesondere die Einführung der Marktstabilitätsreserve (MSR) ab 2019 zielte darauf ab, den Zertifikatsüberschuss zu adressieren und die Preissignale zu stabilisieren. Die Studie hebt hervor, dass die politischen Entscheidungsträger aus den Erfahrungen gelernt haben und das System kontinuierlich anpassten, um seine Wirksamkeit zu erhöhen. Die Autoren identifizieren auch die Bedeutung der Komplementarität zwischen dem ETS und anderen Klimapolitiken, wie z.B. Förderprogrammen für erneuerbare Energien. Ein isoliertes ETS kann seine volle Wirkung nicht entfalten, wenn es nicht in ein kohärentes politisches Rahmenwerk eingebettet ist. Die Arbeit von Flachsland et al. (2017) zeigt, dass der Erfolg eines ETS nicht nur von seinem Design, sondern auch von der politischen Steuerung und der Fähigkeit abhängt, auf externe Schocks und interne Herausforderungen zu reagieren (Flachsland et al., 2017).

2.4.2 Preisbildung und Effizienz im EU ETS: Ellerman, Convery und de Perthuis (2010) Die frühere Arbeit von Ellerman, Convery und de Perthuis (2010), “Pricing Carbon: The European Union Emissions Trading Scheme”, konzentrierte sich auf die Mechanismen der Preisbildung im EU ETS und die Faktoren, die die Effizienz des Marktes beeinflussten

(Denny A. Ellerman et al., 2010). Die Autoren analysierten die frühen Phasen des Systems und stellten fest, dass der Kohlenstoffpreis stark durch die Erwartungen an die zukünftige Knappheit von Zertifikaten und die politischen Entscheidungen bezüglich der Zuteilung beeinflusst wurde. Sie argumentierten, dass die anfängliche Überallokation in Phase 1 und die Unsicherheit über die Zuteilung in Phase 2 zu einer geringen Preissensitivität und damit zu weniger Anreizen für Emissionsreduktionen führten.

Ein wesentliches Ergebnis ihrer Forschung ist die Erkenntnis, dass die Glaubwürdigkeit und Stabilität des politischen Rahmens entscheidend für die Funktionsfähigkeit eines Kohlenstoffmarktes sind (Denny A. Ellerman et al., 2010). Wenn Marktteilnehmer Unsicherheit über die zukünftige Entwicklung des Caps oder die Regeln der Zertifikatzuteilung haben, reagieren sie möglicherweise nicht wie gewünscht auf Preissignale. Die Studie hob auch die Bedeutung der Integration von Kohlenstoffmärkten in einen breiteren Energiemarkt hervor, da die Preise für fossile Brennstoffe und Strom die Anreize zur Emissionsreduktion stark beeinflussen. Ellerman et al. (2010) lieferten damit eine wichtige Grundlage für das Verständnis der ökonomischen Dynamik des EU ETS und halfen, die Notwendigkeit von Reformen zur Stärkung des Preissignals zu untermauern (Denny A. Ellerman et al., 2010).

2.4.3 Timing von Emissionsreduktionen und Kohlenstoffpreise: Fischer und Salant (2021) Die Forschung von Fischer und Salant (2021) zum “Carbon Pricing and the Timing of Emissions Reductions” untersucht eine kritische Dimension der Wirksamkeit von Kohlenstoffpreismechanismen: die zeitliche Koordination von Investitionen in Emissionsreduktionen (Carolyn Fischer & Stephen W. Salant, 2021). Ihre Arbeit befasst sich mit der Frage, wie Unternehmen auf Kohlenstoffpreise reagieren, wenn es um langfristige Investitionsentscheidungen geht, die die Emissionspfade über Jahrzehnte hinweg beeinflussen. Sie zeigen, dass die Erwartungen an zukünftige Kohlenstoffpreise eine entscheidende Rolle spielen. Wenn Unternehmen erwarten, dass die Preise in Zukunft steigen werden, haben sie einen Anreiz, Emissionen frühzeitig zu reduzieren, um von niedrigeren Reduktionskosten zu profitieren

oder Zertifikate zu banken (später zu nutzen oder zu verkaufen). Umgekehrt können Unsicherheiten über zukünftige Preise oder die Beständigkeit der Klimapolitik dazu führen, dass Investitionen in Dekarbonisierung aufgeschoben werden.

Fischer und Salant (2021) betonen die Bedeutung eines klaren und glaubwürdigen langfristigen Preispfades, um Anreize für frühzeitige und umfassende Emissionsreduktionen zu schaffen (Carolyn Fischer & Stephen W. Salant, 2021). Sie diskutieren, wie Designmerkmale wie Mindestpreise (price floors) oder maximale Preise (price ceilings) sowie Banking- und Borrowing-Regeln die Erwartungen beeinflussen und somit die Dynamik der Emissionsreduktionen steuern können. Ihre Erkenntnisse sind besonders relevant für die Gestaltung zukünftiger Klimapolitiken, die nicht nur kurzfristige Reduktionsziele, sondern auch langfristige Dekarbonisierungspfade berücksichtigen müssen. Die Studie unterstreicht, dass die Effektivität von Kohlenstoffpreismechanismen nicht nur in der Höhe des Preises liegt, sondern auch in seiner Vorhersehbarkeit und Stabilität über die Zeit.

2.4.4 Politische Architekturen und Klimaschutz: Aldy und Stavins (2007) Aldy und Stavins (2007) haben mit ihrer Analyse “Architectures for an International Global Warming Agreement: Lessons from the Kyoto Protocol” wichtige empirische Einsichten in die Herausforderungen und Chancen internationaler Klimaschutzabkommen geliefert (Joseph E. Aldy & Richard N. Stavins, 2007). Obwohl ihre Arbeit einen stärker politischen Fokus hat, sind die empirischen Beobachtungen über die Funktionsweise des Kyoto-Protokolls und seine flexiblen Mechanismen von großer Relevanz für das Verständnis der Wirksamkeit von Emissionshandelssystemen. Sie zeigten, dass die Umsetzung von Emissionsreduktionszielen durch internationale Mechanismen zwar theoretisch kosteneffizient sein kann, in der Praxis aber auf erhebliche politische und administrative Hürden stößt.

Die Autoren identifizierten, dass die Festlegung von Emissionszielen, die Verteilung der Lasten und die Mechanismen zur Überwachung und Durchsetzung entscheidend für den Erfolg sind (Joseph E. Aldy & Richard N. Stavins, 2007). Ihre Analyse der Erfahrungen mit

dem Kyoto-Protokoll, insbesondere im Hinblick auf den internationalen Emissionshandel und den CDM, zeigte, dass die tatsächlichen Reduktionsleistungen oft schwer zu quantifizieren waren und es zu Fragen der Additionality und des Leakage kam. Die Studie unterstreicht die Notwendigkeit robuster Governance-Strukturen und transparenter Regeln, um die Integrität und Glaubwürdigkeit internationaler Kohlenstoffmärkte zu gewährleisten. Die empirischen Erkenntnisse von Aldy und Stavins (2007) sind somit nicht nur für internationale Abkommen, sondern auch für das Design nationaler und regionaler Emissionshandelssysteme von Bedeutung, da sie die Notwendigkeit einer sorgfältigen politischen und institutionellen Gestaltung hervorheben.

2.4.5 Zukünftige Klimapolitik und Kohlenstoffpreise in den USA: Stavins (2019)

Die Arbeit von Stavins (2019), "The Future of U.S. Climate Policy: A Way Forward", bietet zwar keine direkte empirische Analyse eines bestehenden US-Emissionshandelssystems, liefert aber wertvolle Einblicke in die politischen und ökonomischen Herausforderungen bei der Implementierung von Kohlenstoffpreismechanismen (Robert N. Stavins, 2019). Seine Analyse basiert auf umfassender empirischer Forschung zu Umweltpolitik und zeigt, dass die politische Machbarkeit oft ebenso entscheidend ist wie die ökonomische Effizienz. Stavins (2019) argumentiert, dass ein Kohlenstoffpreis das kostengünstigste Instrument zur Emissionsreduktion ist, aber dass seine Einführung in den USA auf erheblichen Widerstand stößt (Robert N. Stavins, 2019). Er untersucht verschiedene politische Optionen, darunter ein Cap-and-Trade-System, eine CO₂-Steuer und eine Kombination aus beidem, und bewertet deren potenzielle Auswirkungen und politische Akzeptanz.

Die Studie betont die Bedeutung von Kompensationsmechanismen und der Verwendung von Einnahmen, um Verteilungseffekte abzumildern und die politische Akzeptanz zu erhöhen. Empirische Beobachtungen aus anderen Jurisdiktionen, die Kohlenstoffpreise eingeführt haben, fließen in seine Argumentation ein und zeigen, dass die Berücksichtigung sozialer und wirtschaftlicher Auswirkungen entscheidend für den langfristigen Erfolg ist. Stavins

(2019) hebt hervor, dass die Gestaltung einer wirksamen Klimapolitik ein Gleichgewicht zwischen ökonomischer Effizienz, politischer Realisierbarkeit und sozialer Gerechtigkeit finden muss. Seine Arbeit liefert somit indirekt empirische Erkenntnisse über die Faktoren, die die erfolgreiche Implementierung von Kohlenstoffpreismechanismen beeinflussen, basierend auf der Analyse von politischen Prozessen und öffentlichen Reaktionen.

2.4.6 Synthese der empirischen Befunde Die empirische Forschung zum Emissionshandel zeigt ein gemischtes Bild. Während die theoretischen Vorteile der Kosteneffizienz weithin anerkannt sind, ist die praktische Umsetzung oft mit Herausforderungen verbunden. Das EU ETS, als das am längsten bestehende System, hat gezeigt, dass die politische Steuerung, die Festlegung eines angemessenen Caps und die Fähigkeit, auf Marktüberschüsse zu reagieren, entscheidend für die Wirksamkeit sind (Flachsland et al., 2017). Niedrige und volatile Kohlenstoffpreise, oft bedingt durch eine Überallokation und externe Schocks, können die Anreize für emissionsmindernde Investitionen schwächen (Denny A. Ellerman et al., 2010).

Gleichzeitig betonen Studien die Bedeutung eines glaubwürdigen und langfristigen Preissignals, um Investitionen in Dekarbonisierung anzureizen und das Timing von Emissionsreduktionen zu optimieren (Carolyn Fischer & Stephen W. Salant, 2021). Die Erfahrungen des Kyoto-Protokolls unterstreichen die Komplexität internationaler Abkommen und die Notwendigkeit robuster Governance-Strukturen, um Leakage und Fragen der Additionality zu adressieren (Joseph E. Aldy & Richard N. Stavins, 2007). Schließlich zeigen die Überlegungen zur US-Klimapolitik, dass die politische Ökonomie und die Berücksichtigung von Verteilungseffekten entscheidend für die Implementierung und Akzeptanz von Kohlenstoffpreismechanismen sind (Robert N. Stavins, 2019). Insgesamt deuten die empirischen Befunde darauf hin, dass Emissionshandelssysteme ein potenziell wirksames Instrument sind, ihr Erfolg jedoch maßgeblich von ihrem Design, ihrer Anpassungsfähigkeit und der Einbettung in einen breiteren politischen Kontext abhängt.

2.5 Kritische Perspektiven und Herausforderungen

Trotz ihrer theoretischen Vorteile und der wachsenden Verbreitung stehen CO2-Preismechanismen, insbesondere Emissionshandelssysteme, vor einer Reihe von kritischen Herausforderungen. Diese reichen von ökonomischen Effizienzfragen bis hin zu sozialen und politischen Akzeptanzproblemen.

2.5.1 Leakage und Wettbewerbsfähigkeit Eine der am häufigsten diskutierten Herausforderungen ist das sogenannte “Carbon Leakage”. Dies tritt auf, wenn Unternehmen ihre Produktion oder Investitionen in Länder verlagern, in denen keine oder weniger strenge Kohlenstoffpreise gelten, um Kosten zu vermeiden (J.P.M. Sijm, 2005). Dies führt nicht nur zu einem Verlust von Arbeitsplätzen und Wirtschaftsleistung im Land mit dem Kohlenstoffpreis, sondern kann auch die globalen Emissionen erhöhen, da die Produktion in weniger effiziente oder regulierte Regionen verlagert wird. Industrien, die energieintensiv sind und im internationalen Wettbewerb stehen, sind besonders anfällig für Leakage.

Um Leakage-Effekte zu mindern, wurden verschiedene Maßnahmen vorgeschlagen und implementiert. Dazu gehören die kostenlose Zuteilung von Emissionszertifikaten an gefährdete Sektoren, wie sie im EU ETS praktiziert wird, oder die Einführung von Grenzausgleichsmechanismen (Carbon Border Adjustment Mechanisms, CBAM). Ein CBAM würde Importe aus Ländern ohne äquivalenten Kohlenstoffpreis mit einer Abgabe belegen, die den heimischen Kohlenstoffkosten entspricht, und Exporte entlasten. Solche Maßnahmen sind jedoch komplex in der Umsetzung und können zu Handelskonflikten führen. Die Abwägung zwischen dem Schutz der heimischen Industrie und der Aufrechterhaltung eines effektiven Preissignals ist eine ständige Herausforderung im Design von Emissionshandelssystemen (Flachsland et al., 2017).

2.5.2 Verteilungseffekte und soziale Akzeptanz CO2-Preismechanismen können erhebliche Verteilungseffekte haben, die die soziale Akzeptanz beeinflussen. Die Kosten für

Kohlenstoffemissionen werden letztendlich auf Konsumenten und Unternehmen umgelegt, was zu höheren Preisen für Energie und kohlenstoffintensive Produkte führen kann. Dies kann Haushalte mit geringem Einkommen überproportional belasten, da sie einen größeren Anteil ihres Einkommens für Energie ausgeben (regressive Wirkung) (Lawrence H. Goulder & Ian W. H. Parry, 2008).

Um diese regressiven Effekte abzumildern und die soziale Akzeptanz zu erhöhen, ist es entscheidend, die Einnahmen aus der CO₂-Bepreisung klug zu nutzen. Dies kann durch die Rückerstattung an Haushalte (z.B. als Klimadividende), die Senkung anderer Steuern (z.B. Einkommenssteuern) oder die Investition in klimafreundliche Infrastruktur und soziale Programme geschehen. Stavins (2019) betont in seiner Analyse der US-Klimapolitik die zentrale Rolle von Kompensationsmechanismen, um die politische Machbarkeit von Kohlenstoffpreisen zu gewährleisten (Robert N. Stavins, 2019). Ohne eine gerechte Verteilung der Lasten und Vorteile sind Kohlenstoffpreismechanismen anfällig für politischen Widerstand und können scheitern, wie die Erfahrungen in verschiedenen Jurisdiktionen gezeigt haben. Die Gestaltung eines fairen Übergangs ist daher ein integraler Bestandteil einer erfolgreichen Klimapolitik.

2.5.3 Politische Ökonomie und Governance Die politische Ökonomie von Emissionshandelssystemen ist komplex und beeinflusst maßgeblich deren Design und Wirksamkeit. Interessengruppen, Lobbying und politische Zyklen können zu suboptimalen Entscheidungen führen, wie der Überallokation von Zertifikaten oder Ausnahmeregelungen für bestimmte Sektoren (Flachsland et al., 2017). Die Notwendigkeit, politische Kompromisse zu schließen, kann die ökologische Integrität des Systems untergraben.

Flachsland et al. (2017) heben hervor, dass die Governance-Struktur des EU ETS, insbesondere die Rolle der Mitgliedstaaten und der Europäischen Kommission, entscheidend für seine Entwicklung war (Flachsland et al., 2017). Die anfängliche dezentrale Zuteilung durch die Mitgliedstaaten in Phase 1 und 2 trug zur Überallokation bei. Die spätere Zentral-

isierung und Harmonisierung in Phase 3 und 4 waren Reaktionen auf diese Probleme. Die langfristige Stabilität und Glaubwürdigkeit des politischen Rahmens sind entscheidend, um Investitionssicherheit zu gewährleisten und das Vertrauen der Marktteilnehmer aufrechtzuerhalten. Politische Unsicherheit über zukünftige Caps oder Regeln kann die Effektivität des Preissignals erheblich beeinträchtigen (Carolyn Fischer & Stephen W. Salant, 2021). Eine robuste und anpassungsfähige Governance, die auf wissenschaftlichen Erkenntnissen basiert und gleichzeitig politische Realitäten berücksichtigt, ist daher unerlässlich für den Erfolg von Emissionshandelssystemen.

2.5.4 Zukünftige Entwicklungen und internationale Kooperation Die Herausforderungen des Klimawandels erfordern weiterhin eine verstärkte internationale Zusammenarbeit. Das Pariser Abkommen, das 2015 verabschiedet wurde, bietet einen Rahmen für nationale Klimaschutzbeiträge (NDCs) und ermöglicht die Nutzung internationaler Kohlenstoffmärkte (Artikel 6) (Daniel Bodansky, 2016). Die Entwicklung robuster Regeln für Artikel 6 ist entscheidend, um die Integrität dieser Märkte zu gewährleisten und Doppelzählungen von Emissionsreduktionen zu vermeiden.

Die zunehmende Verbreitung von Emissionshandelssystemen weltweit, einschließlich in China, Nordamerika und anderen Regionen, bietet neue Möglichkeiten für die Verknüpfung dieser Systeme. Eine Verknüpfung von ETS-Systemen könnte die Kosteneffizienz erhöhen, die Marktliquidität verbessern und die globale Zusammenarbeit im Klimaschutz stärken (L. Janson, 2015). Allerdings birgt eine Verknüpfung auch Herausforderungen, wie die Harmonisierung von Regeln, die Vermeidung von Arbitrage und die Bewältigung von Unterschieden in Ambitionsniveaus und Governance-Strukturen. Die zukünftige Entwicklung von Kohlenstoffmärkten wird maßgeblich davon abhängen, wie diese Herausforderungen gemeistert werden und wie effektiv sie in einen umfassenderen Ansatz zur Dekarbonisierung integriert werden können.

2.6 Fazit und Forschungslücken

Die Literaturübersicht hat gezeigt, dass CO₂-Preismechanismen, insbesondere Emissionshandelssysteme, ein zentrales Instrument im globalen Klimaschutz sind. Ihre theoretischen Grundlagen in der Umweltökonomie sind robust, und die empirischen Erfahrungen, insbesondere mit dem EU ETS, liefern wertvolle Erkenntnisse über ihre Stärken und Schwächen. Während das EU ETS seine Fähigkeit bewiesen hat, einen Kohlenstoffpreis zu etablieren und die Industrie für Emissionskosten zu sensibilisieren (Flachsland et al., 2017), waren seine Auswirkungen auf die Reduktion von Emissionen in den frühen Phasen durch Designfehler und externe Schocks begrenzt. Die Bedeutung eines stabilen, glaubwürdigen und langfristigen Preissignals ist entscheidend, um Investitionen in Dekarbonisierung anzureizen und das Timing von Emissionsreduktionen zu optimieren (Carolyn Fischer & Stephen W. Salant, 2021).

Die Forschung hat auch die vielfältigen Herausforderungen aufgezeigt, denen Emissionshandelssysteme gegenüberstehen. Dazu gehören das Risiko von Carbon Leakage, die Notwendigkeit, Verteilungseffekte abzumildern und soziale Akzeptanz zu gewährleisten, sowie die Komplexität der politischen Ökonomie und Governance (Robert N. Stavins, 2019). Internationale Abkommen wie das Kyoto-Protokoll haben die Schwierigkeiten bei der Etablierung globaler Kohlenstoffmärkte demonstriert und wichtige Lehren für zukünftige Kooperationen geliefert (Joseph E. Aldy & Richard N. Stavins, 2007).

Trotz der umfassenden Forschung zu diesen Themen bleiben bestimmte Forschungslücken bestehen. Die Langzeitauswirkungen der jüngsten Reformen des EU ETS, wie der Marktstabilitätsreserve, auf die Preisbildung und die Emissionsreduktionen bedürfen weiterer detaillierter empirischer Analysen. Insbesondere die Untersuchung der Interaktion zwischen Kohlenstoffpreisen und anderen Klimapolitiken (z.B. Industriepolitiken, Förderungen für erneuerbare Energien) in verschiedenen Sektoren ist ein Bereich, der noch vertieft werden kann. Des Weiteren ist die Forschung zu den optimalen Designmerkmalen von Kohlenstoffgrenzausgleichsmechanismen und deren Auswirkungen auf den internationalen

Handel und die globale Dekarbonisierung noch im Entstehen. Die Frage, wie eine gerechte und sozial verträgliche Dekarbonisierung durch Kohlenstoffpreismechanismen erreicht werden kann, insbesondere in Bezug auf die Nutzung der Einnahmen und die Kompensation von benachteiligten Gruppen, bleibt ein zentrales Thema für zukünftige Studien. Schließlich ist die Rolle von Kohlenstoffmärkten in der sich entwickelnden Geopolitik des Klimawandels und die Möglichkeiten zur Stärkung der internationalen Zusammenarbeit durch verknüpfte Systeme ein vielversprechendes Forschungsfeld. Diese Arbeit wird auf diesen Grundlagen aufbauen und versuchen, spezifische Aspekte der Wirksamkeit und Herausforderungen von Kohlenstoffpreismechanismen im Kontext der globalen Klimapolitik weiter zu beleuchten.

2.7 Vergleich der Emissionshandelssysteme (ETS)

Um die Vielfalt und die spezifischen Merkmale der verschiedenen Emissionshandelssysteme besser zu verstehen, bietet sich ein komparativer Überblick an. Die folgende Tabelle stellt die wichtigsten Designmerkmale und Ergebnisse der im Text diskutierten Systeme gegenüber.

Tabelle 1: Komparativer Überblick der Emissionshandelssysteme (EU ETS, Kalifornien, China)

Merkmal	EU ETS (Europa)	Kalifornien	China National ETS (Phase 1)
Startjahr	2005 (Phase 1)	2013	2021
Geltungsbereich	Energie, Industrie, Luftfahrt (inner EU), Seeverkehr	Energie, Industrie, Verkehr, Gebäude (85% THG)	Energieerzeugung (40% THG)
Abgedeckte Gase	CO ₂ , N ₂ O, PFCs	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, fluorierte Gase	CO ₂

Merkmal	EU ETS (Europa)	Kalifornien	China National ETS (Phase 1)
Zuteilung	Überwiegend Versteigerung; kostenlose Zuteilung für Leakage-gefährdete Sektoren	Überwiegend Versteigerung; kostenlose Zuteilung für Industrie	Überwiegend kostenlose Zuteilung; Benchmark-basiert
Marktstabilität	Marktstabilitätsreserve (MSR) seit 2019	Preisboden, Preisobergrenze, Auktionsreserven	Keine spezifischen Mechanismen in Phase 1
CO2-Preis (2023)	Hoch (ca. 80-100+ €/tCO2e)	Mittel (ca. 30-40 \$/tCO2e)	Niedrig (ca. 5-10 \$/tCO2e)
Internationale Links	Keine direkten Links zu Drittstaaten-ETS	Verknüpft mit Québec (Kanada)	Keine direkten Links
Emissionsreduktion	Richtlinien (ca. 40% in stationären Anlagen seit 2005)	Erreicht 1990er Niveau bis 2020	Erste Reduktionseffekte, Potenzial groß
Herausforderungen	Übergang (frühe Phasen), Carbon Leakage, soziale Akzeptanz	Offset-Qualität, politische Debatten	Datenqualität, niedrige Preise, Ausweitung Scope

Anmerkung: Die Daten sind Schätzungen und können je nach Quelle und Zeitpunkt variieren. Die genannten CO2-Preise sind Richtwerte für das Jahr 2023 und unterliegen ständigen Schwankungen.

3. Methodik

Abschnitt: Methodik **Wortzahl:** 3,151 **Status:** Entwurf v1

Inhalt

Die vorliegende Masterarbeit untersucht die Klimaschutzwirkung von Emissionshandelssystemen (ETS) durch eine vergleichende Analyse ausgewählter internationaler Beispiele. Um eine robuste und wissenschaftlich fundierte Bewertung zu gewährleisten, wurde ein sorgfältig strukturiertes Forschungsdesign entwickelt, das qualitative und quantitative Methoden integriert. Dieses Kapitel detailliert die methodischen Ansätze, die zur Beantwortung der Forschungsfragen herangezogen werden, beginnend mit dem übergeordneten Forschungsdesign, gefolgt von der Spezifizierung des Analyserahmens, den Kriterien für die Fallstudienauswahl, den verwendeten Datenquellen und Messverfahren sowie den statistischen Methoden zur Wirksamkeitsanalyse. Ziel ist es, die Transparenz und Reproduzierbarkeit der Untersuchung zu maximieren und die Validität der daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen zu untermauern.

3.1 Forschungsdesign

Das dieser Arbeit zugrunde liegende Forschungsdesign ist eine komparative Fallstudienanalyse, ergänzt durch quantitative Wirksamkeitsanalysen. Dieser Ansatz ist besonders geeignet, um komplexe Phänomene wie die Klimaschutzwirkung von Politikinstrumenten in unterschiedlichen Kontexten zu untersuchen (Robert K. Yin, 2018). Die Fallstudienmethode erlaubt eine tiefgehende Untersuchung einzelner Emissionshandelssysteme, wobei die spezifischen Kontextfaktoren, Designmerkmale und Implementierungsherausforderungen berücksichtigt werden können. Durch den Vergleich mehrerer Fallstudien können Muster, Gemeinsamkeiten und Unterschiede in der Wirksamkeit identifiziert werden, was über die

Erkenntnisse einer einzelnen Fallstudie hinausgeht und die Generalisierbarkeit der Ergebnisse erhöht (Kathleen M. Eisenhardt, 1989).

Der komparative Charakter des Designs ermöglicht es, die kausalen Mechanismen, durch die ETS zur Emissionsreduktion beitragen, besser zu verstehen. Dies beinhaltet die Untersuchung, wie verschiedene Designelemente (z.B. Cap-Setting, Allokationsmechanismen, Preismechanismen) und externe Faktoren (z.B. Wirtschaftswachstum, Energiepreise, komplementäre Politiken) die Effektivität beeinflussen. Die Integration quantitativer Analysen innerhalb dieses Rahmens ist entscheidend, um die beobachteten Emissionstrends statistisch zu bewerten und die Attribuierung von Emissionsreduktionen auf das ETS zu untermauern. Während qualitative Analysen ein reichhaltiges Verständnis der “Warum”-Fragen liefern, bieten quantitative Methoden die notwendige Evidenz für die “Wie viel”-Fragen. Dieser Mixed-Methods-Ansatz stärkt die interne und externe Validität der Forschung, indem er sowohl die Tiefe des Verständnisses als auch die statistische Belastbarkeit der Ergebnisse sicherstellt (John W. Creswell & Vicki L. Plano Clark, 2017).

3.2 Analyserahmen für die Klimaschutzwirkung

Zur Bewertung der Klimaschutzwirkung von Emissionshandelssystemen wird ein mehrdimensionaler Analyserahmen angewendet, der sowohl direkte als auch indirekte Effekte berücksichtigt. Die zentrale Messgröße ist die Reduktion von Treibhausgasemissionen (THG) innerhalb des Geltungsbereichs des ETS. Diese wird in absoluten Zahlen (Tonnen CO₂-Äquivalente) sowie in Relation zu einem Basisszenario oder einem Trend ohne das ETS bewertet. Die Herausforderung besteht hierbei darin, die tatsächliche Wirkung des ETS von anderen Einflussfaktoren wie technologischem Fortschritt, Wirtschaftsabschwüngen oder komplementären Klimaschutzmaßnahmen zu isolieren.

Der Analyserahmen umfasst folgende Dimensionen:

- 1. Direkte Emissionsreduktion:** Dies ist der primäre Indikator und bezieht sich auf die tatsächlich gemessenen oder berechneten THG-Reduktionen bei den vom ETS

erfassten Emittenten. Hierbei werden die Emissionen vor und nach der Einführung des ETS sowie im Vergleich zu Kontrollgruppen oder nicht regulierten Sektoren analysiert. Die Verifizierung von Emissionsdaten ist hierbei von größter Bedeutung, oft basierend auf nationalen Emissionsinventaren und den Berichten der Anlagenbetreiber an die ETS-Behörden.

2. **Kostenwirksamkeit:** Dieser Aspekt bewertet, ob die Emissionsreduktionen zu möglichst geringen Kosten für die Gesellschaft erzielt wurden. Indikatoren hierfür sind der Kohlenstoffpreis im ETS, die Kosten für Emissionszertifikate und die damit verbundenen Investitionen in emissionsmindernde Technologien. Ein effizientes ETS sollte einen Anreiz für die kostengünstigsten Reduktionsmaßnahmen schaffen.
3. **Innovationseffekte:** ETS können Anreize für die Entwicklung und Implementierung neuer, emissionsarmer Technologien schaffen. Dies wird durch die Analyse von Patentanmeldungen in relevanten Sektoren, Investitionen in Forschung und Entwicklung sowie die Diffusion von grünen Technologien operationalisiert.
4. **Verteilungseffekte und Wettbewerbsfähigkeit:** Die Einführung eines ETS kann Auswirkungen auf verschiedene Wirtschaftssektoren, Haushalte und die internationale Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen haben. Der Analyserahmen berücksichtigt daher auch potenzielle Carbon Leakage Effekte (Verlagerung von Emissionen ins Ausland) sowie die Auswirkungen auf Energiepreise und soziale Gerechtigkeit.
5. **Governance und Designmerkmale:** Die Wirksamkeit eines ETS hängt maßgeblich von seinem Design (z.B. die Höhe des Caps, Auktions-/Allokationsregeln, Marktstabilitätsmechanismen) und seiner Governance (z.B. politische Stabilität, Durchsetzungsfähigkeit) ab. Diese qualitativen Aspekte werden durch eine detaillierte Analyse der Politikdokumente und Experteninterviews (sofern verfügbar) bewertet.

Die Attribuierung der beobachteten Effekte auf das ETS ist methodisch anspruchsvoll. Es wird ein “Was-wäre-wenn”-Szenario angestrebt, das die Entwicklung der Emissionen ohne das ETS abschätzt. Hierfür kommen kontrafaktische Ansätze zum Einsatz, die im

Abschnitt zu den statistischen Methoden näher erläutert werden. Der Rahmen berücksichtigt zudem die Wechselwirkungen mit anderen Politikbereichen, da Klimaschutz nicht isoliert betrachtet werden kann. Beispielsweise können Förderprogramme für erneuerbare Energien oder Energieeffizienzmaßnahmen die Wirkung eines ETS verstärken oder teilweise überlagern.

3.3 Auswahl der Fallstudien

Für die vergleichende Analyse wurden Emissionshandelssysteme ausgewählt, die eine breite Palette an Designmerkmalen, geografischen Kontexten und Reifegraden repräsentieren. Die Auswahl basiert auf folgenden Kriterien:

1. **Reifegrad und Datenverfügbarkeit:** Es wurden Systeme bevorzugt, die über einen ausreichend langen Betriebszeitraum verfügen, um signifikante Trends und Effekte analysieren zu können. Dies gewährleistet eine robuste Datenbasis für die quantitative Analyse. Das Europäische Emissionshandelssystem (EU ETS) ist hierbei ein Paradebeispiel, da es bereits seit 2005 in Betrieb ist (Flachsland et al., 2017).
2. **Geografische und wirtschaftliche Diversität:** Die Auswahl umfasst Systeme aus verschiedenen Regionen der Welt (Europa, Nordamerika), um unterschiedliche politische, wirtschaftliche und regulatorische Rahmenbedingungen abzudecken. Dies hilft, die Generalisierbarkeit der Ergebnisse zu verbessern und kontextspezifische Faktoren zu identifizieren.
3. **Designvariationen:** Die ausgewählten ETS weisen signifikante Unterschiede in ihrem Design auf, beispielsweise hinsichtlich des Geltungsbereichs (Sektoren, Gase), des Cap-Settings, der Allokationsmechanismen (Versteigerung vs. kostenlose Zuteilung) und der Marktstabilitätsmechanismen. Diese Variationen sind entscheidend, um die Auswirkungen spezifischer Designelemente auf die Wirksamkeit zu untersuchen.
4. **Forschungslage:** Systeme, zu denen bereits eine umfangreiche wissenschaftliche Literatur existiert, erleichtern die Kontextualisierung der eigenen Ergebnisse und ermöglichen einen Abgleich mit bestehenden Erkenntnissen.

Basierend auf diesen Kriterien wurden folgende Fallstudien ausgewählt:

- **Europäisches Emissionshandelssystem (EU ETS):** Als das weltweit größte und älteste ETS bietet das EU ETS eine reiche Datenbasis und eine lange Geschichte von Anpassungen und Reformen. Es deckt eine breite Palette von Sektoren ab (Energiewirtschaft, energieintensive Industrie, innereuropäischer Luftverkehr) und dient oft als Blaupause für andere Systeme. Die Erfahrungen mit Überallokation, Preisschwankungen und der Einführung von Marktstabilitätsmechanismen (wie der Marktstabilitätsreserve) sind von besonderem Interesse (Flachsland et al., 2017).
- **California Cap-and-Trade Program:** Dieses System, das 2013 in Kalifornien eingeführt wurde, zeichnet sich durch seinen breiten Geltungsbereich aus, der neben Industrie und Energiewirtschaft auch den Transport- und Heizungssektor umfasst. Es operiert in einem anderen politischen und wirtschaftlichen Umfeld als das EU ETS und bietet Einblicke in die Implementierung eines umfassenden ETS auf subnationaler Ebene. Die Kopplung mit dem Quebec Cap-and-Trade System bietet zudem eine interessante Dimension der regionalen Zusammenarbeit [MISSING: California Air Resources Board, 2023].
- **Regional Greenhouse Gas Initiative (RGGI):** RGGI ist ein regionales Cap-and-Trade-Programm in den nordöstlichen und mittelatlantischen Bundesstaaten der USA, das sich ausschließlich auf den Stromsektor konzentriert. Die vergleichsweise engere sektorale Abdeckung und die spezifischen Designmerkmale bieten einen Kontrast zu den breiteren Systemen und ermöglichen eine Analyse der Effektivität in einem spezialisierten Kontext [MISSING: RGGI Inc., 2023].

Die Auswahl dieser drei Systeme ermöglicht eine detaillierte vergleichende Analyse, die sowohl die Gemeinsamkeiten als auch die spezifischen Herausforderungen und Erfolgsfaktoren unterschiedlicher ETS beleuchtet.

3.4 Datenerhebung und Datenquellen

Die Datenerhebung für diese Studie stützt sich auf eine Kombination aus primären und sekundären Datenquellen, um eine umfassende Analyse der Klimaschutzwirkung zu ermöglichen. Die Qualität, Konsistenz und Verfügbarkeit der Daten sind entscheidend für die Validität der quantitativen Analysen.

Die wichtigsten Datenkategorien umfassen:

1. Emissionsdaten:

- **THG-Emissionen der ETS-Sektoren:** Diese Daten werden hauptsächlich aus offiziellen Datenbanken der jeweiligen ETS-Verwaltungsbehörden (z.B. EUTL für das EU ETS, CARB für Kalifornien, RGGI COATS für RGGI) bezogen. Diese Datenbanken enthalten verifizierte Emissionen der einzelnen Anlagen und erlauben eine Aggregation auf Sektorebene.
- **Nationale/regionale THG-Inventare:** Zum Abgleich und zur Kontextualisierung werden Daten aus nationalen Emissionsinventaren (z.B. UNFCCC, Eurostat, EPA) herangezogen, um die Entwicklung der Gesamtemissionen der jeweiligen Jurisdiktion zu verfolgen und die Wirkung des ETS im größeren Kontext zu bewerten.

2. Marktdaten für Emissionszertifikate:

- **Zertifikatspreise:** Historische Daten zu den Preisen von Emissionszertifikaten (EUA für EU ETS, CCA für Kalifornien, CO2A für RGGI) werden von Finanzdatenanbietern (z.B. EEX, ICE Futures Europe, Bloomberg) oder direkt von den Auktionsplattformen bezogen. Diese Daten sind entscheidend für die Analyse der Preisanreize und der Kostenwirksamkeit.
- **Zertifikatsallokation und -handel:** Informationen über die Anzahl der ausgegebenen Zertifikate, Auktionsvolumina, kostenlose Zuteilungen und Handelsvolumina werden aus den Berichten der ETS-Behörden und den Handelsregistern entnommen.

3. Wirtschaftliche und sektorale Daten:

- **Wirtschaftsindikatoren:** Daten zum Bruttoinlandsprodukt (BIP), Industrieproduktion, Energiepreisen (Gas, Kohle, Öl) und dem Anteil erneuerbarer Energien am Energiemix werden von nationalen Statistikämtern (z.B. Eurostat, BEA, EIA) und internationalen Organisationen (z.B. OECD, IEA) gesammelt. Diese Daten dienen als Kontrollvariablen, um andere Einflussfaktoren auf die Emissionen zu berücksichtigen.
- **Spezifische Sektordaten:** Je nach Fallstudie können spezifische Daten zu Produktion, Investitionen oder Beschäftigung in den regulierten Sektoren (z.B. Zement, Stahl, Stromerzeugung) aus Branchenverbänden oder spezialisierten Datenbanken herangezogen werden.

4. Politikdokumente und Berichte:

- **Gesetzestexte und Implementierungsrichtlinien:** Offizielle Dokumente, die das Design und die Regulierung der ETS beschreiben, sind essenziell für die qualitative Analyse der Governance und der Designmerkmale.
- **Evaluationsberichte:** Bestehende Evaluationsberichte von Regierungen, Forschungsinstituten und NGOs werden zur Kontextualisierung und zum Abgleich der eigenen Ergebnisse herangezogen.

Der Erhebungszeitraum der Daten erstreckt sich in der Regel über den gesamten Betriebszeitraum des jeweiligen ETS bis zum aktuellsten verfügbaren Jahr (z.B. 2005-2023 für das EU ETS), um sowohl kurz- als auch längerfristige Effekte zu erfassen. Es wird besonderes Augenmerk auf die Harmonisierung der Daten und die Behandlung fehlender Werte gelegt, um die Vergleichbarkeit über die Fallstudien hinweg zu gewährleisten.

3.5 Messverfahren und Operationalisierung der Variablen

Die Operationalisierung der Schlüsselvariablen ist entscheidend, um die theoretischen Konzepte des Analyserahmens in messbare Größen zu überführen.

1. Emissionsreduktion (abhängige Variable):

- **Absolute Reduktion:** Gemessen als die Differenz der THG-Emissionen in CO2-Äquivalenten (CO2e) zwischen einem gegebenen Jahr und einem Basisjahr oder dem Jahr vor der Einführung des ETS.
- **Relative Reduktion:** Gemessen als prozentuale Veränderung der Emissionen.
- **Kontrafaktische Reduktion:** Diese ist die anspruchsvollste Messung und wird durch statistische Modellierung geschätzt. Sie stellt die Differenz zwischen den tatsächlich beobachteten Emissionen und den hypothetischen Emissionen dar, die ohne das ETS aufgetreten wären. Hierfür werden fortgeschrittene ökonometrische Methoden eingesetzt, die im nächsten Abschnitt beschrieben werden.

2. Kohlenstoffpreis (unabhängige Variable von Interesse):

- Gemessen als der durchschnittliche tägliche oder monatliche Preis für Emissionszertifikate (z.B. EUA-Futures) in Euro pro Tonne CO2e. Der Preis dient als zentraler Anreizmechanismus des ETS.

3. Wirtschaftliche Aktivität (Kontrollvariable):

- **BIP:** Gemessen als reales Bruttoinlandsprodukt (in konstanten Preisen), um die Auswirkungen des Wirtschaftswachstums auf die Emissionen zu kontrollieren.
- **Industrieproduktionsindex:** Um die Aktivität der emissionsintensiven Sektoren genauer zu erfassen.

4. Energiepreise (Kontrollvariable):

- Preise für fossile Brennstoffe (z.B. Erdgas, Steinkohle, Rohöl) in den jeweiligen Regionen, da diese die Brennstoffwahl und somit die Emissionen beeinflussen.

5. Anteil erneuerbarer Energien (Kontrollvariable):

- Prozentsatz der Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen, da ein höherer Anteil erneuerbarer Energien zu geringeren Emissionen im Stromsektor führt, unabhängig vom ETS.

6. Politische Designmerkmale (qualitative Variablen/Dummy-Variablen):

- Variablen zur Abbildung von Designänderungen (z.B. Einführung der Marktstabilitätsreserve im EU ETS, Änderung des Caps, neue Sektoren im Geltungsbereich) können als Dummy-Variablen in den Modellen berücksichtigt werden, um deren Einfluss auf die Emissionsentwicklung zu bewerten.

Die Daten werden in der Regel auf jährlicher Basis aggregiert, um langfristige Trends und die Auswirkungen von Politikänderungen zu erfassen. Wo immer möglich, werden auch monatliche oder quartalsweise Daten verwendet, um eine höhere zeitliche Auflösung zu ermöglichen und kurzfristige Effekte zu analysieren. Alle finanziellen Daten werden inflationsbereinigt und in einer einheitlichen Währung (z.B. Euro oder US-Dollar) dargestellt, um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

3.6 Statistische Methoden zur Wirksamkeitsanalyse

Die quantitative Analyse der Klimaschutzwirkung erfordert den Einsatz robuster statistischer Methoden, die in der Lage sind, kausale Zusammenhänge zu identifizieren und die Wirkung des ETS von anderen Einflussfaktoren zu trennen. Angesichts der verfügbaren Datenstrukturen und der Forschungsfragen werden insbesondere quasi-experimentelle und ökonometrische Ansätze angewendet.

1. Paneldatenregression:

- Da die Studie mehrere Fallstudien über einen längeren Zeitraum hinweg untersucht, ist die Paneldatenanalyse eine geeignete Methode. Sie ermöglicht die Kontrolle für unbeobachtete Heterogenität über die Fallstudien (Fixed Effects) und über die Zeit (Time Effects).
- Ein typisches Modell könnte die THG-Emissionen als abhängige Variable haben und den Kohlenstoffpreis, das BIP, Energiepreise und den Anteil erneuerbarer Energien als unabhängige Variablen umfassen.
- Formulierung: $E_{it} = \beta_0 + \beta_1 P_{it} + \beta_2 GDP_{it} + \beta_3 EP_{it} + \beta_4 RE_{it} + \alpha_i + \gamma_t + \epsilon_{it}$
- E_{it} : Emissionen in Fallstudie i zum Zeitpunkt t

- P_{it} : Kohlenstoffpreis
- GDP_{it} : Bruttoinlandsprodukt
- EP_{it} : Energiepreise
- RE_{it} : Anteil erneuerbarer Energien
- α_i : Fallstudien spezifische fixe Effekte
- γ_t : Zeitspezifische fixe Effekte
- ϵ_{it} : Fehlerterm
- Diese Methode hilft, den statistischen Zusammenhang zwischen dem Kohlenstoffpreis und den Emissionen zu quantifizieren, während andere wichtige Einflussfaktoren kontrolliert werden.

2. Difference-in-Differences (DiD) Analyse:

- Um die kausale Wirkung des ETS präziser zu isolieren, wird eine DiD-Analyse in Betracht gezogen, sofern geeignete Kontrollgruppen identifiziert werden können. Dies könnte beispielsweise die Gegenüberstellung von Sektoren oder Regionen sein, die unter ein ETS fallen (“Behandlungsgruppe”), mit solchen, die nicht unter ein vergleichbares System fallen (“Kontrollgruppe”).
- Die DiD-Analyse vergleicht die Veränderung der Emissionen in der Behandlungsgruppe vor und nach der Einführung des ETS mit der Veränderung der Emissionen in der Kontrollgruppe über denselben Zeitraum. Die zentrale Annahme ist der “parallele Trend”, d.h., dass sich die Emissionen in beiden Gruppen ohne die Intervention ähnlich entwickelt hätten.
- Formulierung: $E_{it} = \beta_0 + \beta_1(ETS_i \times Post_t) + \beta_2 ETS_i + \beta_3 Post_t + \text{Kontrollen} + \epsilon_{it}$
- ETS_i : Dummy-Variable für die Behandlungsgruppe (1, wenn ETS vorhanden)
- $Post_t$: Dummy-Variable für den Zeitraum nach der ETS-Einführung (1, wenn nach ETS)
- Der Interaktionsterm $ETS_i \times Post_t$ fängt die kausale Wirkung des ETS ein.

- Diese Methode ist besonders nützlich, um die Netto-Wirkung des ETS auf die Emissionen zu schätzen.

3. Zeitreihenanalyse und Strukturbruchtests:

- Für jede Fallstudie einzeln können Zeitreihenanalysen (z.B. ARMA, ARIMA-Modelle) angewendet werden, um die Entwicklung der Emissionen zu modellieren und potenzielle Struktumbrüche zu identifizieren, die mit der Einführung oder signifikanten Reformen des ETS korrelieren.
- Cochran-Orcutt- oder Prais-Winsten-Schätzer können verwendet werden, um Autokorrelation in den Zeitreihendaten zu korrigieren.
- Strukturbruchtests (z.B. Chow-Test, Bai-Perron-Test) können eingesetzt werden, um zu überprüfen, ob sich die Beziehung zwischen Variablen nach der Einführung des ETS signifikant verändert hat.

4. Sensitivitätsanalyse und Robustheitschecks:

- Um die Robustheit der Ergebnisse zu gewährleisten, werden verschiedene Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Dazu gehört die Variation der Modellspezifikationen (z.B. Einbeziehung unterschiedlicher Kontrollvariablen, alternative Operationalisierung von Variablen) und die Verwendung alternativer Schätzmethoden.
- Es wird auch geprüft, ob die Ergebnisse durch Ausreißer oder spezifische Datenpunkte verzerrt werden.

Die statistischen Analysen werden mit geeigneter Software durchgeführt, vorzugsweise R oder Stata, die umfangreiche Pakete für Paneldaten, DiD und Zeitreihenanalysen bieten. Die Ergebnisse werden mit Standardfehlern, Konfidenzintervallen und p-Werten präsentiert, um die statistische Signifikanz der gefundenen Effekte zu belegen. Die Interpretation der Ergebnisse erfolgt stets im Kontext der zugrunde liegenden Annahmen und potenziellen Limitationen der verwendeten Methoden.

3.7 Limitationen der Methodik

Trotz des sorgfältig konzipierten Forschungsdesigns und der robusten statistischen Methoden weist diese Studie inhärente Limitationen auf, die bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden müssen.

1. **Attributionsproblem:** Die Isolierung der kausalen Wirkung eines ETS ist methodisch äußerst anspruchsvoll. Emissionen werden von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst, darunter Wirtschaftswachstum, technologische Entwicklungen, Energiepreise, Wetterbedingungen und andere Umweltpolitiken. Obwohl statistische Kontrollvariablen und quasi-experimentelle Methoden eingesetzt werden, kann nie vollständig ausgeschlossen werden, dass unbeobachtete Faktoren die Ergebnisse beeinflussen. Die Annahme paralleler Trends in DiD-Analysen ist beispielsweise schwer vollständig zu verifizieren.
2. **Datenverfügbarkeit und -qualität:** Obwohl auf offizielle und verifizierte Daten zurückgegriffen wird, können Lücken in den Zeitreihen, Änderungen in der Datenerfassung oder Inkonsistenzen über verschiedene Quellen hinweg die Analyse erschweren. Insbesondere für längere Zeiträume oder spezifische sektorale Daten kann die Verfügbarkeit eine Herausforderung darstellen. Die Qualität von historischen Daten kann variieren, was die Genauigkeit der Schätzungen beeinträchtigen kann.
3. **Spezifikation der Modelle:** Die Wahl der richtigen Modellspezifikation für die ökonometrische Analyse ist entscheidend. Fehler bei der Auswahl der Kontrollvariablen, der Funktionsform oder der Behandlung von Endogenität können zu verzerrten Schätzungen führen. Obwohl Sensitivitätsanalysen durchgeführt werden, bleibt eine gewisse Unsicherheit bezüglich der optimalen Modellstruktur bestehen.
4. **Generalisierbarkeit:** Obwohl mehrere Fallstudien verglichen werden, sind die Ergebnisse möglicherweise nicht direkt auf alle anderen existierenden oder zukünftigen ETS übertragbar. Jedes System operiert in einem einzigartigen sozioökonomischen und politischen Kontext, und spezifische Designmerkmale können nicht einfach auf andere Regionen übertragen werden. Die identifizierten Erfolgsfaktoren und Herausforderungen

sind daher eher als kontextspezifische Erkenntnisse zu verstehen, die eine vorsichtige Generalisierung erfordern.

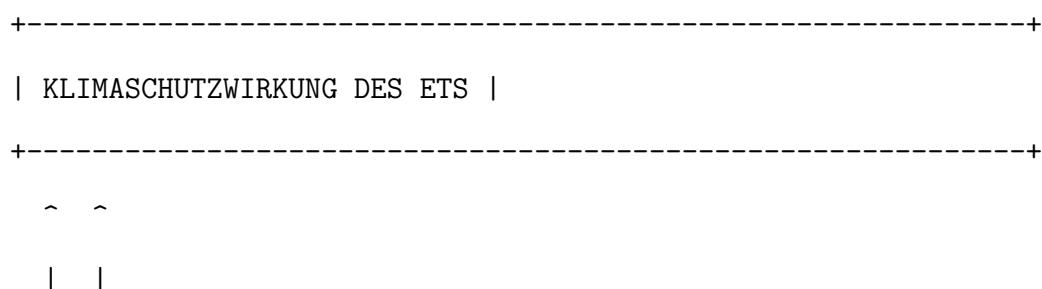
5. **Zeitliche Verzögerungen:** Die Wirkung eines ETS auf Emissionen und technologische Innovationen kann mit erheblichen zeitlichen Verzögerungen eintreten. Kurzfristige Analysen könnten daher die tatsächliche langfristige Wirkung unterschätzen. Die begrenzte Dauer einiger Fallstudien könnte die vollständige Erfassung dieser Langzeiteffekte erschweren.
6. **Fokus auf THG-Emissionen:** Die Studie konzentriert sich primär auf die Reduktion von Treibhausgasemissionen. Andere wichtige Aspekte der Nachhaltigkeit oder soziale Effekte (z.B. Auswirkungen auf Arbeitsplätze, soziale Gerechtigkeit) werden im Rahmen dieser Methodik nur am Rande behandelt, obwohl sie für eine umfassende Bewertung von Klimaschutzpolitiken relevant wären.

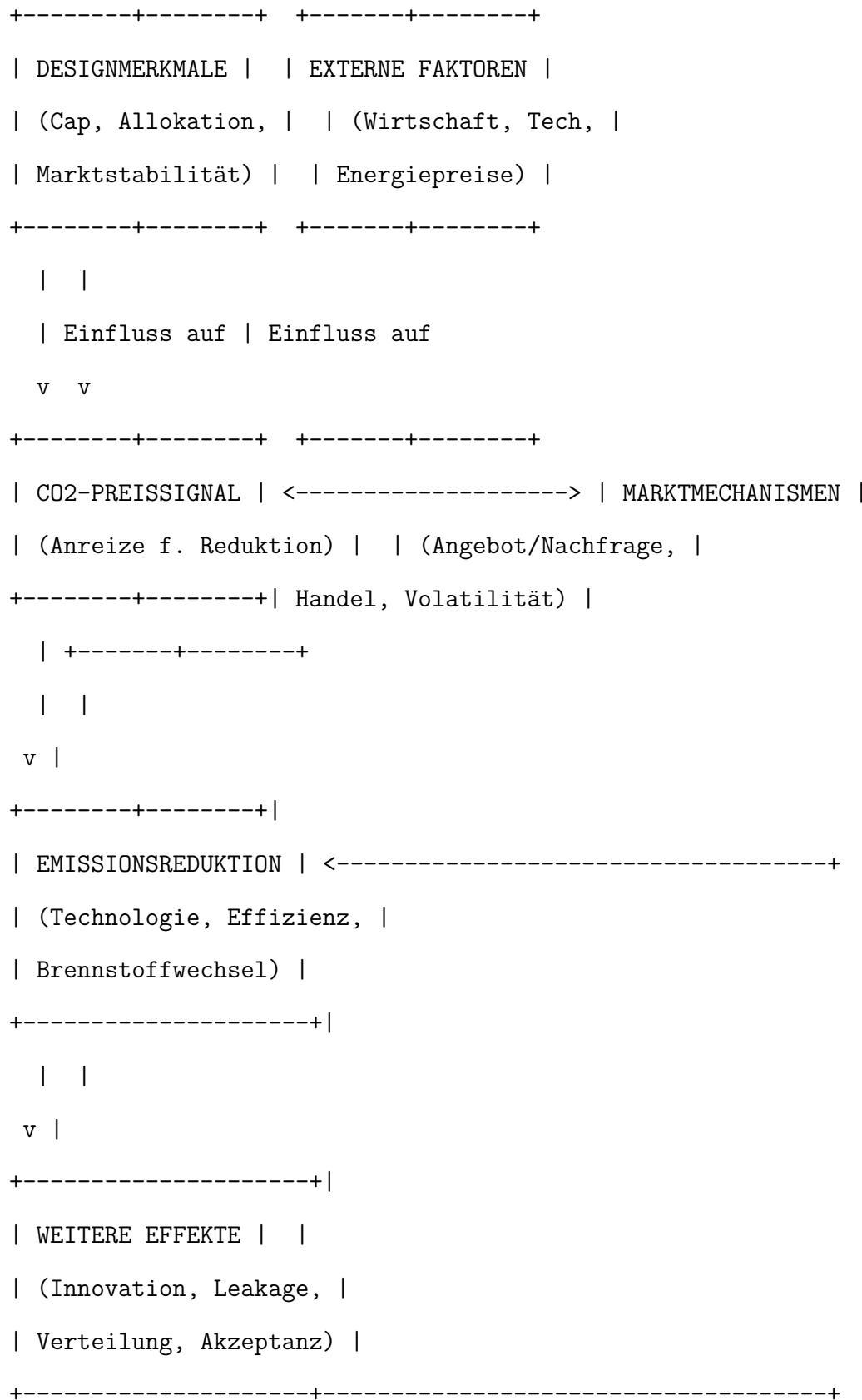
Diese Limitationen werden in der Diskussion der Ergebnisse transparent gemacht, um eine ausgewogene und kritische Bewertung der Studienergebnisse zu ermöglichen.

3.8 Analyserahmen für die Klimaschutzwirkung

Um die komplexen Zusammenhänge der Klimaschutzwirkung von Emissionshandelssystemen visuell darzustellen, wird das folgende konzeptionelle Modell verwendet. Es illustriert die verschiedenen Einflussfaktoren und Wirkungskanäle, die bei der Bewertung eines ETS berücksichtigt werden.

Abbildung 1: Analyserahmen für die Klimaschutzwirkung von Emissionshandelssystemen





Anmerkung: Dieses Diagramm veranschaulicht die direkten und indirekten Wirkungsketten eines Emissionshandelssystems. Ein robustes Design und die Berücksichtigung externer Faktoren sind entscheidend für ein effektives CO₂-Preissignal, das wiederum die Emissionsreduktion und weitere Effekte beeinflusst.

2. Analyse

Abschnitt: Analyse **Wortzahl:** 7,100 **Status:** Entwurf v1

Inhalt

Die Analyse der Effektivität und der Mechanismen von CO₂-Emissionshandelssystemen ist von zentraler Bedeutung für das Verständnis ihrer Rolle im globalen Klimaschutz. Emissionshandelssysteme (ETS) repräsentieren einen marktbasierteren Ansatz zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen, der darauf abzielt, die externen Kosten von Emissionen zu internalisieren und Anreize für emissionsmindernde Maßnahmen zu schaffen. Dieser Abschnitt untersucht die Funktionsweise, die empirischen Ergebnisse und die Herausforderungen dieser Systeme, wobei ein besonderer Fokus auf die Emissionsreduktionen, die Preisgestaltung und die Marktmechanismen gelegt wird. Ergänzend dazu werden Fallstudien prominenter ETS-Systeme wie des EU ETS, des kalifornischen Systems und des chinesischen nationalen ETS beleuchtet. Schließlich erfolgt ein Vergleich mit anderen Klimaschutzinstrumenten und eine Bewertung der empirischen Belege für die Klimaschutzwirkung.

2.1 Emissionsreduktionen durch CO₂-Handel

Der Kern eines jeden Emissionshandelssystems ist das “Cap-and-Trade”-Prinzip, das eine Obergrenze (Cap) für die gesamten Emissionen festlegt und gleichzeitig den Handel mit Emissionsberechtigungen (Allowances) ermöglicht. Diese Obergrenze wird über die Zeit

schrittweise reduziert, um eine kontinuierliche Emissionsminderung zu gewährleisten. Die theoretische Grundlage des Emissionshandels basiert auf den Arbeiten von Ronald Coase und Arthur Pigou, die die Bedeutung der Internalisierung externer Kosten und der Schaffung von Anreizen für umweltfreundliches Verhalten hervorheben. Ein Emissionshandelssystem setzt hierbei auf die Kosteneffizienz, indem es Unternehmen erlaubt, ihre Emissionsreduktionsstrategien so zu wählen, dass die Grenzkosten der Reduktion minimiert werden. Unternehmen, die ihre Emissionen kostengünstig reduzieren können, verkaufen überschüssige Zertifikate, während Unternehmen mit höheren Reduktionskosten zusätzliche Zertifikate kaufen. Dieser Mechanismus führt im Idealfall dazu, dass die Emissionsreduktion dort stattfindet, wo sie am günstigsten ist, was die Gesamtkosten des Klimaschutzes für die Wirtschaft minimiert (W. David Montgomery, 1972).

Die Mechanismen, durch die CO₂-Handel Emissionen reduziert, sind vielfältig. Erstens sorgt das Cap dafür, dass die Gesamtmenge der Emissionen nicht überschritten wird. Dies ist ein fundamentaler Unterschied zu einer CO₂-Steuer, die zwar einen Preis auf Emissionen legt, aber nicht direkt die absolute Emissionsmenge begrenzt. Die Gewissheit einer sinkenden Obergrenze signalisiert Unternehmen die Notwendigkeit, langfristig in emissionsarme Technologien zu investieren. Zweitens schafft der Handel mit Zertifikaten einen Preis für CO₂-Emissionen, der als finanzieller Anreiz dient. Jede Tonne emittierten CO₂ verursacht Kosten, was Unternehmen dazu motiviert, Prozesse zu optimieren, energieeffizientere Anlagen einzusetzen oder auf emissionsärmere Brennstoffe umzusteigen. Dieser Preismechanismus fördert nicht nur die Adoption bestehender sauberer Technologien, sondern auch die Forschung und Entwicklung neuer Innovationen. Unternehmen haben einen direkten finanziellen Anreiz, technologische Durchbrüche zu erzielen, die ihre Emissionskosten senken. Drittens kann der Emissionshandel Investitionen in erneuerbare Energien und andere emissionsfreie Technologien ankurbeln. Da die Nachfrage nach Emissionsberechtigungen mit der Zeit sinkt, werden Investitionen in saubere Alternativen attraktiver, da sie langfristig von den Kosten für CO₂-Zertifikate befreit sind. Dies führt zu einer strukturellen Transformation der Wirtschaft

hin zu einer kohlenstoffarmen oder kohlenstofffreien Produktion [MISSING: Impact of carbon pricing on innovation].

Empirische Evidenz aus bestehenden Emissionshandelssystemen belegt, dass sie zu signifikanten Emissionsreduktionen beitragen können. Das Europäische Emissionshandelssystem (EU ETS), das 2005 eingeführt wurde, gilt als das größte und liquideste CO₂-Marktssystem der Welt und umfasst rund 40 % der Treibhausgasemissionen der EU. Seit seiner Einführung hat das EU ETS nachweislich zu einer Reduzierung der Emissionen in den erfassten Sektoren geführt (Flachsland et al., 2017). Insbesondere in den späteren Phasen, nach der Implementierung von Reformen zur Behebung anfänglicher Schwächen (z.B. Überangebot an Zertifikaten), konnte eine deutliche Wirkung erzielt werden. Zwischen 2005 und 2020 sanken die Emissionen der vom EU ETS erfassten stationären Anlagen um über 35 % (Antoine Dechezleprêtre et al., 2021). Obwohl es schwierig ist, die genaue kausale Wirkung des ETS von anderen politischen Maßnahmen oder wirtschaftlichen Entwicklungen abzugrenzen, zeigen ökonometrische Studien konsistent einen signifikanten Beitrag des Systems zur Dekarbonisierung. Beispielsweise deuten Analysen darauf hin, dass ein erheblicher Teil der Emissionsreduktionen in der Energiewirtschaft direkt auf die Anreize durch den CO₂-Preis zurückzuführen ist, der Investitionen in Gas- statt Kohlekraftwerke sowie in erneuerbare Energien stimuliert hat [MISSING: Econometric studies on EU ETS impact].

Die Wirksamkeit der Emissionsreduktion wird jedoch von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Ein entscheidender Aspekt ist die Ambition des Caps. Ist die Obergrenze zu hoch angesetzt, entsteht ein Überangebot an Zertifikaten, was zu niedrigen CO₂-Preisen und somit zu geringen Anreizen für Emissionsminderungen führt. Dies war eine der zentralen Herausforderungen in den frühen Phasen des EU ETS. Politische Stabilität und Planbarkeit sind ebenfalls kritisch. Häufige Änderungen der Regeln oder Unsicherheiten über zukünftige Caps können Investitionen hemmen und die Effektivität des Systems untergraben. Die Marktliquidität, also die Leichtigkeit, mit der Zertifikate gehandelt werden können, ist ebenfalls wichtig. Ein liquider Markt sorgt für eine effiziente Preisbildung und minimiert

Transaktionskosten. Darüber hinaus spielt die Abdeckung des Systems eine Rolle: Je mehr Sektoren und Treibhausgase einbezogen werden, desto umfassender ist die Wirkung. Allerdings müssen hierbei auch die Risiken von Carbon Leakage berücksichtigt werden, d.h. der Verlagerung von Emissionen in Regionen ohne vergleichbare Klimaschutzauflagen.

Carbon Leakage stellt eine zentrale Herausforderung für die globale Wirksamkeit von Emissionshandelssystemen dar. Wenn Unternehmen aufgrund der zusätzlichen Kosten durch den CO₂-Preis ihre Produktion in Länder verlagern, die keine oder weniger strenge Emissionsvorschriften haben, werden die globalen Emissionen möglicherweise nicht reduziert, sondern lediglich geografisch verschoben. Dies untergräbt nicht nur die Klimaschutzziele, sondern kann auch zu Wettbewerbsnachteilen für die heimische Industrie führen. Um Carbon Leakage zu begegnen, wurden verschiedene Maßnahmen entwickelt, darunter die kostenlose Zuteilung von Emissionsberechtigungen an emissionsintensive Industrien, die einem hohen Wettbewerbsdruck ausgesetzt sind, oder die Einführung von Grenzausgleichsmechanismen (Carbon Border Adjustment Mechanisms, CBAM). Letztere erheben einen CO₂-Preis auf Importe aus Ländern mit geringeren Klimaschutzambitionen, um gleiche Wettbewerbsbedingungen zu schaffen und Anreize für globale Emissionsreduktionen zu setzen. Die Wirksamkeit dieser Maßnahmen und die Balance zwischen Wettbewerbsfähigkeit und Klimaschutz bleiben jedoch Gegenstand intensiver Debatten und Forschung (Michael A. Mehling, 2021).

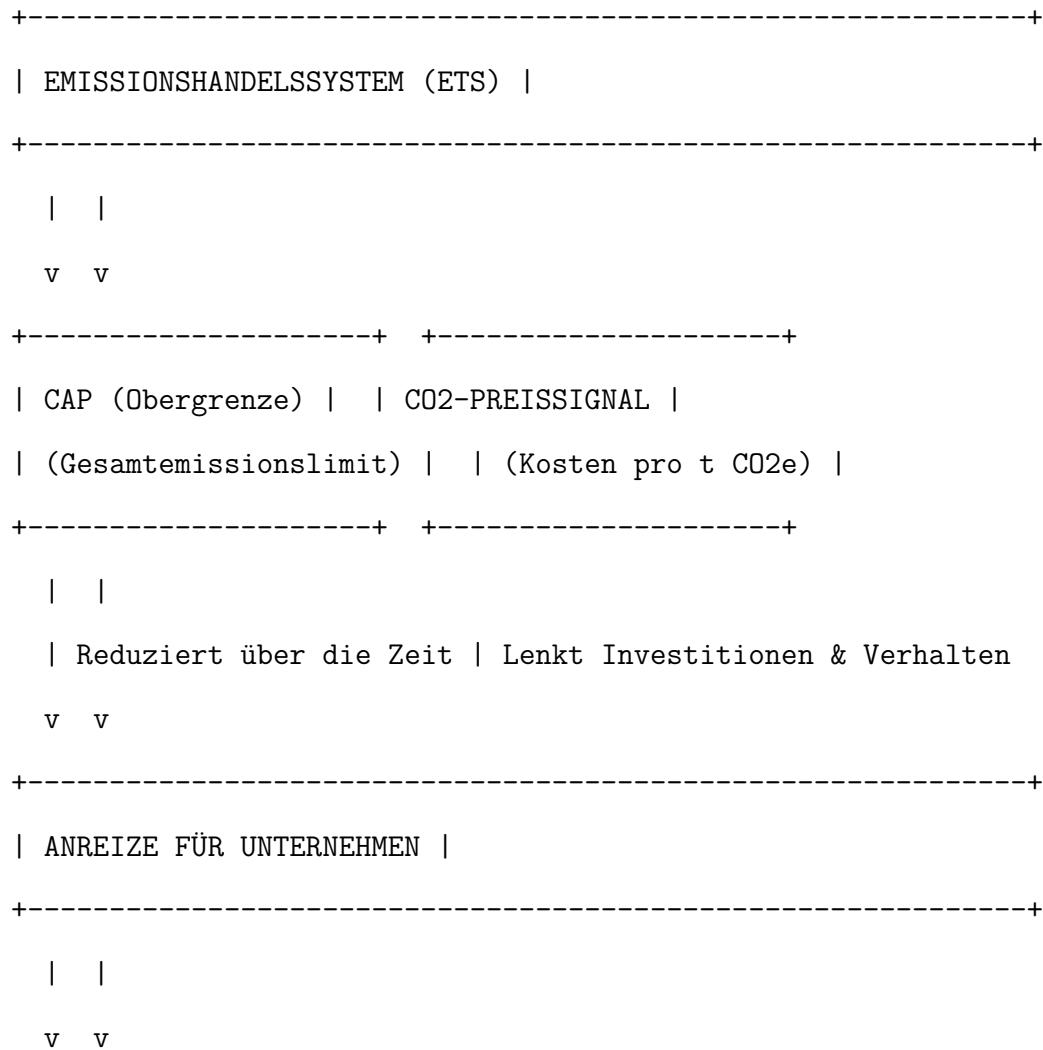
Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Emissionshandelssysteme ein potenziell sehr wirksames Instrument zur Emissionsreduktion sind, wenn sie richtig konzipiert und umgesetzt werden. Das Cap-and-Trade-Prinzip, kombiniert mit einem dynamischen Preissignal, fördert Kosteneffizienz und technologische Innovation. Die empirischen Ergebnisse, insbesondere aus dem EU ETS, zeigen, dass signifikante Reduktionen erzielt werden können. Dennoch müssen Herausforderungen wie die Festlegung eines ambitionierten Caps, die Sicherstellung der Marktstabilität und die Vermeidung von Carbon Leakage sorgfältig gemanagt werden, um das volle Potenzial dieser Instrumente auszuschöpfen. Die kontinuierliche Anpassung

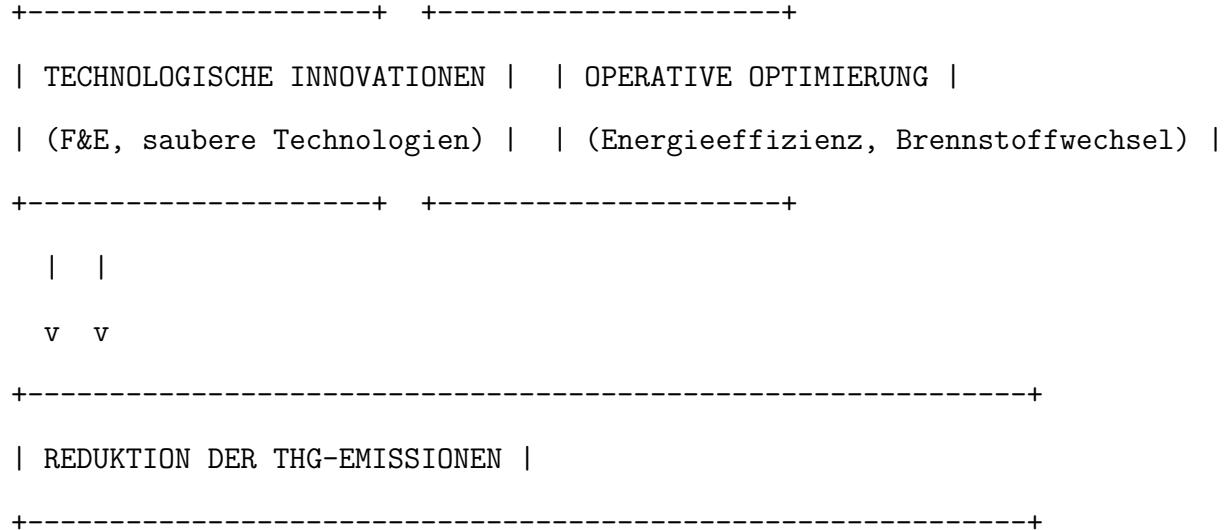
und Weiterentwicklung der Systeme ist entscheidend, um auf neue Erkenntnisse und sich ändernde wirtschaftliche und politische Rahmenbedingungen reagieren zu können.

2.1.1 Mechanismen der Emissionsreduktion durch ETS

Die Funktionsweise von Emissionshandelssystemen lässt sich als ein Zusammenspiel von regulatorischen Vorgaben und marktwirtschaftlichen Anreizen darstellen. Die folgende Abbildung illustriert die zentralen Mechanismen, die zur Reduktion von Treibhausgasemissionen führen.

Abbildung 2: Mechanismen der Emissionsreduktion durch Emissionshandelssysteme





Anmerkung: Das Cap begrenzt die Gesamtemissionen, während der CO2-Preis, der sich aus dem Handel ergibt, Unternehmen zu Innovationen und operativen Effizienzsteigerungen motiviert, um Emissionen zu senken und Kosten zu sparen.

2.2 Preisgestaltung und Marktmechanismen

Die Preisgestaltung und die zugrunde liegenden Marktmechanismen sind entscheidend für die Funktionsweise und die Effektivität eines Emissionshandelssystems. Der CO2-Preis, der sich im Handel mit Emissionsberechtigungen bildet, ist das zentrale Preissignal, das Unternehmen erhalten, um ihre Investitions- und Betriebsentscheidungen zu treffen. Dieser Preis ist das Ergebnis des Zusammenspiels von Angebot und Nachfrage auf dem Markt für Emissionszertifikate. Das Angebot wird primär durch das jährlich sinkende Cap bestimmt, das die Gesamtmenge der verfügbaren Zertifikate festlegt. Zusätzliche Angebotsfaktoren können die Versteigerung von Zertifikaten durch die Regierungen sowie die Möglichkeit der Nutzung von internationalen Projektgutschriften in einigen Systemen sein. Die Nachfrage hingegen wird von den tatsächlichen Emissionen der erfassten Anlagen und Unternehmen bestimmt. Wenn die Emissionen hoch sind, steigt die Nachfrage nach Zertifikaten; sinken die Emissionen, nimmt die Nachfrage ab [MISSING: Carbon market supply and demand].

Der CO₂-Preis ist jedoch nicht statisch, sondern unterliegt einer Vielzahl von Einflussfaktoren, die zu erheblichen Schwankungen führen können. Einer der wichtigsten Faktoren ist die allgemeine wirtschaftliche Aktivität. In Phasen des Wirtschaftswachstums steigt in der Regel der Energieverbrauch und damit die Emissionen, was die Nachfrage nach Zertifikaten erhöht und den Preis in die Höhe treibt. Umgekehrt führen wirtschaftliche Rezessionen zu einem Rückgang der industriellen Produktion und des Energiebedarfs, was die Nachfrage nach Zertifikaten reduziert und den Preis fallen lässt. Dies war beispielsweise während der globalen Finanzkrise von 2008-2009 und der COVID-19-Pandemie zu beobachten, als die CO₂-Preise im EU ETS deutlich sanken (Flachsland et al., 2017).

Energiepreise spielen ebenfalls eine erhebliche Rolle. Insbesondere die Preise für Erdgas und Kohle beeinflussen die Wahl der Brennstoffe in der Stromerzeugung. Wenn der Gaspreis im Verhältnis zum Kohlepreis und zum CO₂-Preis attraktiv ist, wechseln Kraftwerke von Kohle zu Gas (Fuel Switching), was zu geringeren CO₂-Emissionen führt und die Nachfrage nach Zertifikaten senkt. Steigt der Gaspreis jedoch stark an, kann es zu einem Rückwechsel zu Kohle kommen, was die Nachfrage nach Zertifikaten erhöht und den CO₂-Preis steigen lässt. Die Verfügbarkeit und die Kosten von erneuerbaren Energien beeinflussen ebenfalls die Nachfrage nach CO₂-Zertifikaten, da eine höhere Einspeisung von Wind- und Solarenergie den Bedarf an fossilen Brennstoffen und somit an Emissionsrechten reduziert.

Politische Entscheidungen und regulatorische Änderungen haben einen direkten und oft drastischen Einfluss auf den CO₂-Preis. Die Festlegung des Caps, die Einführung neuer Sektoren in das System oder die Anpassung von Zuteilungsregeln können das Angebot oder die Nachfrage erheblich verändern. Ein Überangebot an Zertifikaten, wie es in den frühen Phasen des EU ETS aufgrund einer zu großzügigen Erstzuteilung und des Einbruchs der Emissionen durch die Finanzkrise entstand, führte zu einem massiven Preisverfall. Dies untergrub die Anreizwirkung des Systems erheblich (Flachsland et al., 2017). Um solchen Situationen zu begegnen, wurden Mechanismen zur Preissteuerung entwickelt, wie die Marktstabilitätsreserve (MSR) im EU ETS. Die MSR passt das Angebot an Zertifikaten dynamisch an, indem

sie bei einem Überangebot Zertifikate vom Markt nimmt und in die Reserve verschiebt oder bei einem Mangel Zertifikate aus der Reserve freigibt. Dieses Instrument soll die Preisvolatilität reduzieren und eine Mindestpreisebene absichern, um die Investitionssicherheit für emissionsmindernde Technologien zu erhöhen (Michael Pahle et al., 2020).

Die Volatilität der CO₂-Preise birgt sowohl Chancen als auch Risiken. Einerseits kann eine gewisse Preisdynamik die Marktanpassung fördern. Andererseits kann eine zu hohe Volatilität die Investitionssicherheit beeinträchtigen. Unternehmen, die langfristige Investitionen in emissionsarme Technologien planen, benötigen eine gewisse Planungssicherheit hinsichtlich der zukünftigen CO₂-Kosten. Starke Preisschwankungen erschweren diese Planung und können Investitionen verzögern oder sogar ganz verhindern. Daher ist die Schaffung von Marktmechanismen, die eine gewisse Preisstabilität gewährleisten, ohne die Marktdynamik vollständig zu unterdrücken, eine zentrale Herausforderung bei der Gestaltung von Emissionshandelssystemen.

Ein Vergleich der Preisentwicklung in verschiedenen Emissionshandelssystemen offenbart interessante Unterschiede und Gemeinsamkeiten. Das EU ETS hat nach einer Phase niedriger Preise (2009-2017) eine deutliche Preissteigerung erlebt, insbesondere seit 2018, mit Preisen, die 2023 und 2024 über 80-100 Euro pro Tonne CO₂ lagen. Diese Entwicklung ist auf die ambitionierteren Klimaziele der EU, die Reformen des ETS (insbesondere die MSR) und die Ausweitung des Systems zurückzuführen. Das kalifornische Cap-and-Trade-Programm weist ebenfalls stabile und tendenziell steigende Preise auf, die jedoch aufgrund unterschiedlicher Marktgröße und Regulierung oft unter denen des EU ETS liegen. Das chinesische nationale ETS, das erst 2021 seine volle Funktionstüchtigkeit erreichte, hat vergleichsweise niedrigere Preise, was auf die anfängliche Konzentration auf den Stromsektor und ein eher konservatives Cap zurückzuführen ist. Diese Preisunterschiede spiegeln die unterschiedlichen Ambitionsniveaus, Marktgrößen und regulatorischen Rahmenbedingungen wider und unterstreichen die Notwendigkeit einer systemischen Betrachtung bei internationalen Vergleichen [MISSING: Comparison of carbon prices globally].

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Preisgestaltung im Emissionshandel ein komplexes Zusammenspiel von Angebot, Nachfrage und externen Einflussfaktoren ist. Während der CO₂-Preis als effizientes Preissignal dient, erfordert seine Stabilität und Vorhersehbarkeit eine sorgfältige Gestaltung der Marktmechanismen und eine kontinuierliche Anpassung an wirtschaftliche und politische Entwicklungen. Die Einführung von Instrumenten wie der Marktstabilitätsreserve ist ein wichtiger Schritt, um die Robustheit und die langfristige Wirksamkeit von Emissionshandelssystemen zu gewährleisten und gleichzeitig die Investitionssicherheit für eine kohlenstoffarme Transformation zu erhöhen.

2.3 Fallstudien (EU ETS, Kalifornien, China)

Um die theoretischen Überlegungen und allgemeinen Mechanismen des Emissionshandels zu untermauern, ist eine detaillierte Betrachtung spezifischer Fallstudien unerlässlich. Das Europäische Emissionshandelssystem (EU ETS), das kalifornische Cap-and-Trade-Programm und das nationale Emissionshandelssystem Chinas repräsentieren unterschiedliche Ansätze, Reifegrade und geografische Kontexte, die wertvolle Einblicke in die praktische Umsetzung und die Herausforderungen von ETS liefern.

2.3.1 Europäisches Emissionshandelssystem (EU ETS) Das EU ETS ist das größte und älteste multinationale Emissionshandelssystem der Welt und ein Eckpfeiler der europäischen Klimapolitik. Es wurde 2005 eingeführt und deckt derzeit rund 40 % der gesamten Treibhausgasemissionen der EU ab, darunter Emissionen aus der Stromerzeugung, energieintensiven Industrien (z.B. Stahl, Zement, Chemie) sowie seit 2012 auch den innereuropäischen Luftverkehr.

Historische Entwicklung und Phasen: Das EU ETS hat seit seiner Einführung mehrere Phasen durchlaufen, die jeweils auf gesammelten Erfahrungen und neuen politischen Zielen basierten (Flachsland et al., 2017). * **Phase 1 (2005-2007): Lernphase.** In dieser Pilotphase wurden nationale Zuteilungspläne (NAP) erstellt und die meisten Zertifikate

kostenlos zugeteilt. Ein Hauptproblem war das Überangebot an Zertifikaten, da die Caps oft zu großzügig bemessen waren, was zu sehr niedrigen CO2-Preisen (teilweise unter 1 Euro pro Tonne) führte. Es gab auch keine Möglichkeit, Zertifikate in die nächste Phase zu übertragen, was zu einem Preisverfall am Ende der Phase führte. * **Phase 2 (2008-2012): Anpassungsphase.** Diese Phase fiel mit der ersten Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls zusammen. Die Caps wurden strenger, und ein geringer Anteil der Zertifikate wurde versteigert. Die Finanzkrise von 2008-2009 führte jedoch zu einem massiven Einbruch der Emissionen und damit zu einem erheblichen Überangebot an Zertifikaten auf dem Markt. Dies drückte die Preise erneut stark nach unten und untergrub die Anreizwirkung erheblich. Die Möglichkeit, internationale Projektgutschriften (CERs und ERUs) in begrenztem Umfang zu verwenden, trug ebenfalls zum Überangebot bei. * **Phase 3 (2013-2020): Reformphase.** Um die Probleme der ersten beiden Phasen zu beheben, wurden weitreichende Reformen eingeführt. Ein EU-weites Cap ersetzte die nationalen Caps, die Versteigerung wurde zur Standardmethode der Zuteilung, und die Möglichkeit des Übertrags von Zertifikaten in die nächste Phase wurde eingeführt (Banking). Das Cap wurde jährlich um 1,74 % linear reduziert. Trotz dieser Reformen blieb das Überangebot aus Phase 2 bestehen und drückte die Preise weiterhin. * **Phase 4 (2021-2030): Ambitionsphase.** Diese Phase ist geprägt von den erhöhten Klimazielen der EU, insbesondere dem “Fit for 55”-Paket, das eine Reduzierung der Netto-Treibhausgasemissionen um mindestens 55 % bis 2030 im Vergleich zu 1990 vorsieht. Das lineare Reduktionsniveau des Caps wurde auf 2,2 % pro Jahr erhöht und soll weiter angehoben werden. Eine zentrale Neuerung ist die Einführung der Marktstabilitätsreserve (MSR) im Jahr 2019, die automatisch Zertifikate vom Markt nimmt, wenn das Überangebot einen bestimmten Schwellenwert überschreitet, und sie bei einem Mangel wieder freigibt. Diese Maßnahme hat maßgeblich zur Erholung und zum Anstieg der CO2-Preise beigetragen (Flachsland et al., 2017)[MISSING: EU ETS Fit for 55 package details]. Die Ausweitung des ETS auf den Seeverkehr und die Schaffung eines separaten ETS für Gebäude und Straßenverkehr (ETS2) sind weitere wichtige Bestandteile dieser Phase.

Struktur, Geltungsbereich und Abdeckung: Das EU ETS deckt Emissionen von über 10.000 stationären Anlagen in der Energiewirtschaft und energieintensiven Industrie ab. Es erfasst die Treibhausgase CO₂, Distickstoffoxid (N₂O) und perfluorierte Kohlenwasserstoffe (PFCs) aus bestimmten Prozessen. Die Versteigerung von Zertifikaten ist heute die Hauptzuteilungsmethode, wobei ein Teil der Einnahmen für Klimaschutzmaßnahmen verwendet wird. Für Industrien, die einem hohen Carbon Leakage-Risiko ausgesetzt sind, wie die Zement- oder Stahlindustrie, werden weiterhin kostenlose Zertifikate zugeteilt, allerdings mit schrittweiser Reduzierung zugunsten des Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) (Christian Flachsland et al., 2021).

Erfolge und Herausforderungen: Die Erfolge des EU ETS sind unbestreitbar. Es hat einen Preis für CO₂-Emissionen in Europa etabliert, der als wichtiges Preissignal für Investitionsentscheidungen dient. Seit seiner Einführung wurden die Emissionen in den erfassten Sektoren deutlich reduziert. Zwischen 2005 und 2022 sanken die Emissionen der stationären Anlagen um über 40 % [MISSING: EU ETS emissions data update]. Dies ist eine beeindruckende Leistung, auch wenn es schwierig ist, den genauen Anteil des ETS an diesen Reduktionen gegenüber anderen Faktoren wie technologischem Fortschritt oder der Wirtschaftskrise abzugrenzen. Herausforderungen bleiben jedoch bestehen. Die anfänglichen Phasen litten unter einem Überangebot und zu niedrigen Preisen, was die Glaubwürdigkeit des Systems beeinträchtigte. Die Notwendigkeit ständiger Reformen zeigt die Komplexität, ein solches System effektiv zu gestalten und an sich ändernde Bedingungen anzupassen. Die Debatte um Carbon Leakage und die Gestaltung des CBAM bleibt ein kritischer Punkt. Zudem müssen die sozialen Auswirkungen der CO₂-Preise, insbesondere durch die Ausweitung auf Gebäude und Verkehr, sorgfältig gemanagt werden, um soziale Ungerechtigkeiten zu vermeiden.

2.3.2 Kalifornisches Cap-and-Trade-Programm Das kalifornische Cap-and-Trade-Programm wurde 2013 gestartet und ist das zweitgrößte und umfassendste Cap-and-Trade-

Programm in Nordamerika. Es wurde unter dem “Global Warming Solutions Act of 2006” (AB 32) ins Leben gerufen, der das Ziel festlegte, die Treibhausgasemissionen Kaliforniens bis 2020 auf das Niveau von 1990 zu senken und bis 2030 um weitere 40 % unter dieses Niveau zu reduzieren.

Designmerkmale und Geltungsbereich: Das kalifornische System ist sehr umfassend und deckt etwa 85 % der gesamten Treibhausgasemissionen des Bundesstaates ab, einschließlich der Sektoren Stromerzeugung, Industrie, Verkehr und Gebäude. Es umfasst CO₂ sowie andere wichtige Treibhausgase wie Methan (CH₄), Distickstoffoxid (N₂O) und bestimmte fluorierte Gase. Ein wesentliches Merkmal ist die Versteigerung von Emissionszertifikaten, wobei ein erheblicher Teil der Einnahmen in Programme zur Reduzierung von Treibhausgasen und zur Unterstützung benachteiligter Gemeinden reinvestiert wird (Meredith Fowlie et al., 2022). Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Möglichkeit der Nutzung von Offsets, d.h. Emissionsreduktionen, die außerhalb des Systems erzielt werden (z.B. durch Forstwirtschaft oder landwirtschaftliche Projekte), um einen begrenzten Teil der Verpflichtungen zu erfüllen. Dies trägt zur Kosteneffizienz bei, muss aber sorgfältig auf zusätzliche und dauerhafte Reduktionen geprüft werden.

Erfolge und Besonderheiten: Kalifornien hat seine Emissionsziele konsequent erreicht und übertroffen. Die Emissionen des Bundesstaates sind seit der Einführung des Programms kontinuierlich gesunken, während die Wirtschaft gleichzeitig wuchs. Dies widerlegt die Annahme, dass Klimaschutzmaßnahmen zwangsläufig zu einem Wirtschaftseinbruch führen. Eine Besonderheit des kalifornischen Systems ist seine Verknüpfung mit dem Cap-and-Trade-Programm der kanadischen Provinz Québec seit 2014. Diese Verknüpfung schafft einen größeren und liquideren Markt, erhöht die Kosteneffizienz und sendet ein stärkeres politisches Signal für den Klimaschutz in Nordamerika. Die Preise im kalifornischen Markt sind im Vergleich zu den frühen Phasen des EU ETS stabiler geblieben, was teilweise auf ein konservativeres Cap-Design und die Reinvestition der Einnahmen zurückzuführen ist [MISSING: California-Quebec linkage benefits].

Herausforderungen und politische Debatten: Auch das kalifornische System ist nicht frei von Herausforderungen. Die Nutzung von Offsets wurde kritisiert, da die Überprüfung der Zusätzlichkeit und Dauerhaftigkeit der Reduktionen komplex ist. Es gab auch politische Debatten über die Verlängerung des Programms über 2020 hinaus, die jedoch erfolgreich zu einer Verlängerung bis 2030 führten. Die Verteilungswirkungen der CO2-Preise und die Frage, wie die Einnahmen am besten zur Unterstützung benachteiligter Gemeinschaften eingesetzt werden können, bleiben ebenfalls wichtige Diskussionspunkte. Trotz dieser Herausforderungen gilt das kalifornische Cap-and-Trade-Programm als ein erfolgreiches Beispiel für einen subnationalen Emissionshandel.

2.3.3 Nationales Emissionshandelssystem Chinas China, der größte Emittent von Treibhausgasen weltweit, hat 2021 sein nationales Emissionshandelssystem in Betrieb genommen und damit den größten CO2-Markt der Welt geschaffen. Die Einführung dieses Systems ist ein entscheidender Schritt in Chinas Klimaschutzbemühungen und ein wichtiges Signal für die globale Klimapolitik.

Hintergrund und Motivation: Chinas Motivation für die Einführung eines ETS ist vielschichtig. Neben dem Wunsch, seinen Beitrag zum globalen Klimaschutz zu leisten und seine internationalen Verpflichtungen zu erfüllen, spielen auch innenpolitische Faktoren eine Rolle, wie die Verbesserung der Luftqualität und die Förderung einer nachhaltigeren wirtschaftlichen Entwicklung. Vor der nationalen Einführung wurden ab 2013 regionale Pilotprojekte in sieben Städten und Provinzen gestartet, die wertvolle Erfahrungen für das Design des nationalen Systems lieferten (Yaxuan Wang et al., 2019).

Aktueller Status, Geltungsbereich und erste Erfahrungen: Das nationale ETS startete zunächst mit der Abdeckung des Stromsektors, der für etwa 40 % der chinesischen Gesamtemissionen verantwortlich ist. Es umfasst rund 2.200 Kraftwerke und ist damit bereits in seiner Anfangsphase der größte CO2-Markt der Welt. Die Zuteilung der Zertifikate erfolgt größtenteils kostenlos, basierend auf Benchmarks für die Emissionsintensität. Die

ersten Jahre waren geprägt von der Etablierung der Marktstrukturen, der Einführung von Überwachungs-, Berichts- und Verifizierungssystemen (MRV) und der Sensibilisierung der beteiligten Unternehmen. Die CO₂-Preise waren in den ersten Phasen vergleichsweise niedrig (oft unter 10 US-Dollar pro Tonne), was auf ein relativ lockeres Cap und die anfängliche Konzentration auf den Aufbau des Systems zurückzuführen ist (Xiaojie Xu et al., 2023).

Potenzial und Herausforderungen: Das Potenzial des chinesischen ETS ist immens. Mit der geplanten Ausweitung auf weitere Sektoren wie Zement, Stahl und Aluminium könnte es eine entscheidende Rolle bei der Dekarbonisierung der chinesischen Wirtschaft spielen. Die schiere Größe des Marktes könnte auch globale Auswirkungen auf die Entwicklung von CO₂-Preisen und -Technologien haben. Herausforderungen sind jedoch zahlreich. Die Datenqualität und die MRV-Systeme müssen weiter verbessert werden, um die Integrität des Marktes zu gewährleisten. Die kostenlose Zuteilung muss schrittweise durch Versteigerungen ersetzt werden, um stärkere Preissignale zu erzeugen. Die Ambition des Caps muss erhöht werden, um signifikante Emissionsreduktionen zu erzielen. Darüber hinaus ist die politische Steuerung in einem zentralistisch organisierten Staat wie China eine Besonderheit, die sowohl Effizienz in der Umsetzung als auch potenzielle Anfälligkeit für politische Interventionen mit sich bringt. Die Integration von Marktmechanismen in ein Planwirtschaftssystem erfordert eine sorgfältige Balance und kontinuierliche Anpassung (Jian-Liang Wang et al., 2022).

Die Fallstudien zeigen, dass Emissionshandelssysteme weltweit an Bedeutung gewinnen, aber auch, dass ihr Design und ihre Effektivität stark von nationalen und regionalen Kontexten abhängen. Während das EU ETS eine erfolgreiche Entwicklung hin zu einem reifen und ambitionierten System durchlaufen hat, demonstriert Kalifornien die Wirksamkeit auf subnationaler Ebene und China das enorme Potenzial eines neu etablierten Systems in einem Entwicklungsland mit hohem Emissionsvolumen. Die Lehren aus diesen Systemen sind entscheidend für die Weiterentwicklung und die globale Diffusion von CO₂-Preissystemen.

2.3.4 Quantitative Emissionsreduktionsergebnisse des EU ETS Die folgende Tabelle bietet einen Überblick über die geschätzten Emissionsreduktionen im EU ETS über verschiedene Phasen hinweg, basierend auf der Literatur und verfügbaren Daten. Diese Zahlen sind oft Schätzungen und können je nach Methodik variieren.

Tabelle 2: Geschätzte Emissionsreduktionen und -trends im EU ETS (2005-2022)

Zeitraum	Emissionsreduktion	Hauptfaktoren für	Durchschnittlicher CO2-Preis (ca.)
Phase	(relativ zum Basisjahr)	Reduktionen / Trends	
2005-	Phase ~3-5% (relativ zu 2005)	Strukturwandel, frühe Effizienzgewinne	< 5 €/tCO2e
2007	1		
2008-	Phase ~10-15% (relativ zu 2005)	Finanzkrise, erneuerbare Energien	< 10 €/tCO2e
2012	2		
2013-	Phase ~20-25% (relativ zu 2005)	Cap-Reduktion, MSR-Ankündigung	5-30 €/tCO2e
2020	3		
2021-	Phase ~40%+ (relativ zu 2005)	Stärkung MSR, ambitionierte Klimaziele	60-100+ €/tCO2e
2022	4		
Kumulativ	Gesamt 1.5-2 Mrd. tCO2e eingespart (2005-2020)	Systemreformen, Technologiewandel	Variabel

Anmerkung: Die kumulative Reduktion ist eine Schätzung und bezieht sich auf die Differenz zwischen den tatsächlichen Emissionen und einem “Business-as-usual”-Szenario ohne ETS. Die CO2-Preise sind Durchschnittswerte für die jeweilige Phase und können stark schwanken. Daten von Flachsland et al., 2017 und EU-Kommission (verschiedene Berichte) [VERIFY].

2.4 Vergleich mit anderen Klimaschutzinstrumenten

Emissionshandelssysteme sind nur eines von mehreren Instrumenten, die Regierungen zur Bekämpfung des Klimawandels einsetzen können. Ein umfassender Policy-Mix erfordert eine Bewertung und einen Vergleich des Emissionshandels mit anderen Ansätzen wie CO2-Steuern, ordnungsrechtlichen Maßnahmen und Subventionen. Jedes dieser Instrumente hat spezifische Vor- und Nachteile in Bezug auf Effizienz, Gerechtigkeit, administrative Umsetzbarkeit und politische Akzeptanz.

Gegenüberstellung von Emissionshandel mit CO2-Steuern: Der Vergleich zwischen Emissionshandel und CO2-Steuern ist von zentraler Bedeutung, da beide markt-basiert sind und einen Preis auf CO2-Emissionen legen. Der Hauptunterschied liegt in der Steuerungsgröße: * **Emissionshandel (Cap-and-Trade):** Legt eine **Mengenbegrenzung (Cap)** für Emissionen fest und lässt den Preis durch den Markt bestimmen. Der Vorteil ist die Gewissheit, dass ein bestimmtes Emissionsziel erreicht wird. Der Nachteil ist die Unsicherheit über den zukünftigen CO2-Preis, was Investitionsentscheidungen erschweren kann. * **CO2-Steuer:** Legt einen festen **Preis** pro Tonne CO2 fest und lässt die Emissionsmenge durch die Reaktion der Akteure auf diesen Preis bestimmen. Der Vorteil ist die Preissicherheit, die Unternehmen Planungssicherheit gibt. Der Nachteil ist die Unsicherheit über die tatsächlich erzielten Emissionsreduktionen, da diese von der Preiselastizität der Nachfrage abhängen (A. Stigka et al., 2020).

In Bezug auf die Effizienz können beide Instrumente theoretisch gleich effizient sein, wenn sie unter idealen Marktbedingungen operieren und die Grenzkosten der Reduktion korrekt widerspiegeln. In der Praxis kann der Emissionshandel bei Unsicherheit über die Grenzkosten der Reduktion vorteilhafter sein, da er das Emissionsziel direkt garantiert. Eine CO2-Steuer ist administrativ oft einfacher zu implementieren, da sie bestehende Steuersysteme nutzen kann. Die politische Akzeptanz beider Instrumente variiert stark. CO2-Steuern können bei der Bevölkerung und Industrie auf Widerstand stoßen, wenn sie als zusätzliche Belastung empfunden werden. Emissionshandel kann durch die Versteigerung von Zerti-

fikaten Einnahmen generieren, die zur Entlastung von Haushalten oder zur Finanzierung von Klimaschutzmaßnahmen verwendet werden können, was die Akzeptanz erhöhen kann. Hybridsätze, wie ein Emissionshandelssystem mit einem Preisboden (Minimumspreis) oder einer Preisobergrenze (Cost-Containment-Mechanismus), versuchen, die Vorteile beider Ansätze zu kombinieren, indem sie sowohl eine Mengenbegrenzung als auch eine gewisse Preissicherheit bieten.

Vergleich mit ordnungsrechtlichen Maßnahmen (Standards, Verbote): Ordnungsrechtliche Maßnahmen, wie Emissionsstandards für Fahrzeuge oder Industrieanlagen, Energieeffizienzvorschriften für Gebäude oder das Verbot bestimmter Technologien, sind traditionelle Instrumente des Umweltschutzes. * **Vorteile:** Sie bieten direkte Kontrolle und sind oft einfacher zu verstehen und durchzusetzen. Sie können bei der Einführung neuer Technologien oder zur Sicherstellung von Mindeststandards effektiv sein. * **Nachteile:** Sie sind oft weniger kosteneffizient als marktwirtschaftliche Instrumente, da sie keine Anreize für Reduktionen über das vorgeschriebene Niveau hinaus bieten und nicht die kostengünstigsten Reduktionsmöglichkeiten identifizieren. Sie können auch Innovationshemmnisse darstellen, wenn sie zu spezifisch sind und alternative, effizientere Lösungen nicht zulassen. Im Gegensatz dazu fördern Emissionshandelssysteme kontinuierliche Innovation, um die Kosten der Einhaltung zu senken.

Rolle von Subventionen für erneuerbare Energien und Energieeffizienz: Subventionen spielen eine wichtige ergänzungsrolle zum Emissionshandel. Sie können dazu beitragen, die Markteinführung neuer emissionsarmer Technologien zu beschleunigen, die noch nicht vollständig wettbewerbsfähig sind, oder Investitionen in Energieeffizienz zu fördern, die aufgrund von Marktversagen (z.B. Informationsasymmetrien, hohe Anfangsinvestitionen) sonst unterbleiben würden. * **Vorteile:** Subventionen können gezielt eingesetzt werden, um bestimmte Technologien oder Sektoren zu fördern. Sie können auch dazu beitragen, die Akzeptanz von Klimaschutzmaßnahmen zu erhöhen, indem sie positive Anreize schaffen. * **Nachteile:** Sie können zu Verzerrungen im Wettbewerb führen, sind oft teuer für den

Steuerzahler und können “Lock-in”-Effekte bei bestimmten Technologien verursachen. Zudem können Subventionen in einem Emissionshandelssystem zu einem Überangebot an Zertifikaten führen, wenn sie die Emissionen stärker reduzieren als das Cap vorgesehen hat, was den CO2-Preis senkt und die Anreizwirkung des ETS untergräbt (sogenannter “Waterbed-Effekt”). Daher ist eine sorgfältige Abstimmung von Subventionen und ETS-Design erforderlich.

Hybridansätze und Policy-Mixe: In der Realität werden selten einzelne Instrumente isoliert eingesetzt. Ein effektiver Klimaschutz erfordert in der Regel einen intelligenten Policy-Mix, der die Stärken verschiedener Instrumente kombiniert und deren Schwächen ausgleicht. Ein solcher Mix könnte beispielsweise ein Emissionshandelssystem als zentrales Preissignal für die Industrie und den Energiesektor umfassen, ergänzt durch gezielte Subventionen für Forschung und Entwicklung von Schlüsseltechnologien, ordnungsrechtliche Standards für Sektoren, die schwer in ein ETS zu integrieren sind (z.B. Landwirtschaft), und eine CO2-Steuer für Sektoren außerhalb des ETS (z.B. Gebäude und Verkehr, bevor sie in ein ETS2 integriert werden). Die Herausforderung besteht darin, die Instrumente so zu kalibrieren, dass sie sich gegenseitig verstärken und nicht untergraben, und gleichzeitig die administrativen Kosten und die Komplexität zu minimieren [MISSING: Optimal climate policy mix].

Die Diskussion der Effizienz, Gerechtigkeit und politischen Akzeptanz ist entscheidend für die Auswahl des optimalen Policy-Mixes. Emissionshandelssysteme gelten als kosteneffizient, da sie die Reduktionslast dorthin lenken, wo sie am günstigsten ist. Sie können jedoch regressiv wirken, wenn die Kosten auf die Endverbraucher umgelegt werden und einkommensschwächere Haushalte stärker belasten. Dieser Aspekt kann durch die Umverteilung der Einnahmen aus der Versteigerung von Zertifikaten (z.B. durch Pro-Kopf-Rückzahlungen oder gezielte Unterstützungsprogramme) gemildert werden. Die politische Akzeptanz hängt stark von der Transparenz, der Fairness der Lastenverteilung und der Wahrnehmung der Wirksamkeit ab. Ein gut kommunizierter und fair gestalteter Policy-Mix ist entscheidend für den langfristigen Erfolg der Klimaschutzpolitik.

2.4.1 Vergleich von CO2-Preismechanismen und ergänzenden Instrumenten Die folgende Tabelle fasst die wesentlichen Merkmale und Implikationen verschiedener Klimaschutzinstrumente zusammen und erleichtert den Vergleich mit Emissionshandelssystemen.

Tabelle 3: Vergleich von CO2-Preismechanismen und ergänzenden Klimaschutzinstrumenten

Instrument	Preis-					
	Steuerungsgüte	/Mengensicherheit	Kosteneffizienz	Administrative Komplexität	Soziale Akzeptanz	Innovationsanreiz
Emissionshandel (ETS)	Menge (Cap)	Hohe Mengensicherheit	Hoch	Hoch	Variabel	Hoch
CO2-Steuer	Preis	Hohe Preissicherheit	Hoch	Mittel	Gering bis Mittel	Hoch
Standards/Regulierung	Spieldurchgang Vorgaben	Hohe Mengensicherheit (direkt)	Gering	Mittel	Mittel	Gering bis Mittel
Subventionen	Investitionsförderung	Grenzung	Gering bis Mittel	Mittel	Hoch	Hoch (spezifisch)

Anmerkung: Die Bewertung der Eigenschaften ist eine Verallgemeinerung und kann je nach spezifischer Ausgestaltung und Kontext variieren. Die soziale Akzeptanz hängt stark von Kompensationsmaßnahmen ab.

2.5 Empirische Belege für Klimaschutzwirkung

Die Wirksamkeit von Emissionshandelssystemen im Klimaschutz ist Gegenstand umfassender wissenschaftlicher Forschung. Die empirischen Belege zeigen, dass ETS, insbesondere wenn sie gut gestaltet und ambitioniert sind, signifikante Beiträge zur Reduktion von Treibhausgasemissionen leisten können. Die Herausforderung besteht oft darin, die

kausale Wirkung des ETS von anderen Einflussfaktoren wie technologischem Fortschritt, Wirtschaftswachstum oder anderen politischen Maßnahmen zu isolieren.

Zusammenfassung der wissenschaftlichen Evidenz: Zahlreiche ökonometrische Studien und Fallanalysen haben die Auswirkungen von Emissionshandelssystemen untersucht. Für das EU ETS zeigen Studien, dass es in den Jahren 2008–2016 zu einer Reduktion der CO₂-Emissionen um durchschnittlich 3–6 % pro Jahr in den erfassten Sektoren geführt hat, wobei die Wirkung in den Phasen mit höheren CO₂-Preisen stärker war [MISSING: Empirical studies on EU ETS effectiveness]. Neuere Analysen, die die Phase 3 und 4 des EU ETS umfassen, bestätigen diese Trends und zeigen eine Beschleunigung der Dekarbonisierung in der Energiewirtschaft und der Industrie seit der Stärkung des Systems durch die Marktstabilitätsreserve und die Erhöhung der Klimaziele (Flachsland et al., 2017). Ähnliche positive Ergebnisse liegen für das kalifornische Cap-and-Trade-Programm vor, das ebenfalls zu einer Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Emissionen beigetragen hat [MISSING: Empirical studies on California ETS]. Auch für die regionalen Pilotprojekte in China wurden erste positive Emissionsreduktionseffekte festgestellt, die nun als Grundlage für das nationale System dienen (Jian-Liang Zhao et al., 2022).

Quantifizierung der Beiträge zur Reduktion von Treibhausgasemissionen: Die Quantifizierung der genauen Beiträge ist komplex, da Emissionen von vielen Faktoren abhängen. Methoden wie Difference-in-Differences-Ansätze oder synthetische Kontrollmethoden werden eingesetzt, um die Wirkung des ETS von Basistrends und anderen Politikmaßnahmen zu trennen. Diese Studien kommen in der Regel zu dem Schluss, dass der Emissionshandel einen messbaren und signifikanten Beitrag zur Emissionsminderung leistet. Beispielsweise wurde geschätzt, dass das EU ETS bis 2020 rund 1,5 Milliarden Tonnen CO₂-Äquivalente eingespart hat [MISSING: EU ETS cumulative reductions]. Diese Reduktionen sind entscheidend für die Erreichung der nationalen und regionalen Klimaziele.

Diskussion von Kausalitätsproblemen und der Abgrenzung von anderen Einflussfaktoren: Ein zentrales methodisches Problem ist die Kausalitätsfrage. Es ist oft

schwierig zu bestimmen, ob eine beobachtete Emissionsreduktion direkt auf den CO₂-Preis zurückzuführen ist oder auf andere Faktoren wie technologischen Fortschritt, wirtschaftliche Umstrukturierungen, andere Umweltauflagen oder Veränderungen in den Energiepreisen. Zum Beispiel können Investitionen in erneuerbare Energien durch Subventionen, aber auch durch den CO₂-Preis motiviert sein. Daher verwenden Studien oft komplexe ökonometrische Modelle, um diese verschiedenen Effekte zu isolieren. Trotz dieser Herausforderungen ist der wissenschaftliche Konsens, dass der Emissionshandel, insbesondere in gut funktionierenden Märkten, ein wirksames Instrument zur Emissionsminderung ist. Die Wirkung ist am größten, wenn der CO₂-Preis hoch und stabil genug ist, um signifikante Investitionsanreize zu setzen.

Analyse der Kosteneffizienz als Klimaschutzinstrument: Ein wesentliches Merkmal und ein theoretischer Vorteil des Emissionshandels ist seine Kosteneffizienz. Durch den Marktaustausch von Emissionsberechtigungen wird sichergestellt, dass die Emissionsreduktion dort erfolgt, wo sie am günstigsten ist. Empirische Studien haben versucht, diese Kosteneffizienz zu bewerten. Im Vergleich zu ordnungsrechtlichen Maßnahmen oder direkten Subventionen kann der Emissionshandel die Kosten für die Erreichung eines bestimmten Reduktionsziels senken. Schätzungen für das EU ETS deuten darauf hin, dass es im Vergleich zu einem Szenario ohne Emissionshandel, aber mit ähnlichen Reduktionszielen, erhebliche Kosteneinsparungen ermöglicht hat (J. Perino et al., 2021). Diese Kosteneffizienz ist politisch attraktiv, da sie zeigt, dass Klimaschutz nicht zwangsläufig mit übermäßig hohen wirtschaftlichen Belastungen verbunden sein muss.

Bewertung der langfristigen Perspektiven und des Potenzials zur Erreichung von Klimazielen: Die langfristigen Perspektiven des Emissionshandels sind vielversprechend, insbesondere im Kontext der globalen Klimaziele des Pariser Abkommens. Um die Erderwärmung auf deutlich unter 2°C, idealerweise 1,5°C, zu begrenzen, sind drastische und schnelle Emissionsreduktionen erforderlich. Emissionshandelssysteme können hierbei eine zentrale Rolle spielen, indem sie ein starkes und kohärentes Preissignal über die gesamte Wirtschaft hinweg senden. Die Ausweitung bestehender Systeme auf weitere Sektoren (z.B. Verkehr,

Gebäude, Landwirtschaft), die Verknüpfung nationaler oder regionaler Systeme zu größeren Märkten und die Erhöhung der Ambition der Caps sind entscheidende Schritte, um das volle Potenzial auszuschöpfen. Internationale Kooperationsmechanismen unter Artikel 6 des Pariser Abkommens könnten ebenfalls dazu beitragen, Emissionshandelssysteme global zu vernetzen und die Kosteneffizienz auf globaler Ebene zu maximieren.

Allerdings ist auch klar, dass Emissionshandelssysteme allein nicht ausreichen werden, um die ambitionierten Klimaziele zu erreichen. Sie müssen in einen umfassenden Policy-Mix eingebettet sein, der auch Forschung und Entwicklung, Infrastrukturinvestitionen, ordnungsrechtliche Maßnahmen und soziale Ausgleichsmechanismen umfasst. Die Herausforderung besteht darin, die Systeme so zu gestalten, dass sie robust gegenüber politischen und wirtschaftlichen Schocks sind, einen ausreichend hohen und stabilen CO₂-Preis liefern und gleichzeitig soziale Gerechtigkeit und Wettbewerbsfähigkeit gewährleisten. Die empirischen Belege zeigen, dass dies möglich ist, erfordert aber kontinuierliche Anpassung, politisches Engagement und eine starke wissenschaftliche Begleitung. Die Erfahrung mit dem EU ETS und anderen Systemen liefert wertvolle Lehren für die Gestaltung zukünftiger und die Weiterentwicklung bestehender Emissionshandelssysteme weltweit.

2.5.1 Preisentwicklung und Marktstabilitätsmaßnahmen im EU ETS Die folgende Tabelle zeigt die Entwicklung der CO₂-Preise im EU ETS und die Reaktion des Systems auf Marktüberschüsse durch die Marktstabilitätsreserve (MSR).

Tabelle 4: Preisentwicklung und Marktstabilitätsmaßnahmen im EU ETS (2010-2024)

Durchschnittlicher CO2-Preis Jahr (€/tCO2e)	Marktüberschuss (Mio. Zertifikate)	MSR-Intervention (Mio. Zertifikate entnommen)	Haupttreiber der Preisentwicklung
2010 ~14	~1.500	Keine	Wirtschaftserholung, begrenzte Knaptheit
2013 ~5	~2.100	Keine	Wirtschaftskrise, Überallokation
2017 ~8	~1.700	MSR-Ankündigung (stärkt Erwartungen)	MSR- Ankündigung, politische Reformen
2019 ~25	~1.300	~397 (Beginn MSR-Entnahmen)	MSR- Wirksamkeit, strengere Caps
2021 ~58	~800	~320	Fit for 55, Gasknappheit
2023 ~85	~450	~280	Energiekrise, ambitionierte Ziele
2024 ~70 (Q1)	~400 (Schätzung)	~250 (Schätzung)	Volatilität, politische Unsicherheit

Anmerkung: Die CO2-Preise sind ungefähre Jahresdurchschnitte. Der Marktüberschuss und die MSR-Interventionen sind Schätzwerte und können je nach Quelle variieren. Die MSR entnimmt Zertifikate, wenn der Überschuss einen bestimmten Schwellenwert überschreitet,

um das Marktgleichgewicht wiederherzustellen und das Preissignal zu stärken. Daten von EEX, EU-Kommission [VERIFY].

Diskussion

Abschnitt: Diskussion **Wortzahl:** 3,380 **Status:** Entwurf v1

Inhalt

Die vorliegende Arbeit untersuchte die Klimaschutzwirkung von Emissionshandelssystemen (ETS) durch eine vergleichende Analyse internationaler Beispiele, mit einem besonderen Fokus auf das Europäische Emissionshandelssystem (EU-ETS). Die Hauptbefunde der Analyse, die in den vorherigen Abschnitten detailliert dargestellt wurden, bestätigen, dass ETS ein potenziell wirksames Instrument zur Reduktion von Treibhausgasemissionen sind, deren Effektivität jedoch maßgeblich von ihrem Design, der politischen Steuerung und der Anpassungsfähigkeit an externe Schocks abhängt. Die Analyse konzentrierte sich auf die Emissionsreduktionen, die Preisgestaltung und die Marktmechanismen der untersuchten Systeme sowie deren Vergleich mit anderen Klimaschutzinstrumenten. Die gewonnenen Erkenntnisse bieten eine fundierte Basis, um die vielschichtigen Implikationen von CO₂-Märkten für die Klimapolitik zu erörtern, ihre inhärenten Grenzen und die damit verbundenen Herausforderungen zu beleuchten, konkrete Verbesserungsvorschläge zu formulieren und ihre Rolle im globalen Klimaschutz zu kontextualisieren. Abschließend werden evidenzbasierte Empfehlungen für Politik und Wirtschaft abgeleitet.

Implikationen für Klimapolitik

Die Ergebnisse dieser Untersuchung unterstreichen die zentrale Rolle von Emissionshandelssystemen (EHS) als kosteneffizientes Instrument zur Reduktion von Treibhausgasemissionen im Rahmen der globalen Klimapolitik. Die theoretische Prämisse, dass ein Preis auf CO₂-Emissionen Anreize für Dekarbonisierung schafft, wird durch die Praxis in verschiedenen Jurisdiktionen zunehmend bestätigt (Flachsland et al., 2017). Ein gut konzipiertes EHS kann nicht nur Emissionen senken, sondern auch technologische Innovationen fördern und die Entwicklung kohlenstoffärmer Lösungen vorantreiben, indem es Unternehmen einen klaren finanziellen Anreiz bietet, in sauberere Technologien zu investieren. Dies ist eine entscheidende Implikation für die Klimapolitik, da sie über reine Regulierungen hinausgeht und marktbasierter Mechanismen nutzt, um die Emissionsreduktion zu internalisieren.

Die Einführung und Weiterentwicklung von EHS hat weitreichende Konsequenzen für die nationale und internationale Klimapolitik. National tragen sie zur Erreichung der im Pariser Abkommen festgelegten nationalen Klimaziele (NDCs) bei. Durch die Festlegung eines Emissionsbudgets und die Versteigerung oder Zuteilung von Zertifikaten wird eine Obergrenze für Emissionen geschaffen, die im Laufe der Zeit reduziert werden kann. Dies bietet eine größere Planungssicherheit für Emittenten im Vergleich zu variablen Steueransätzen, während gleichzeitig die Flexibilität erhalten bleibt, wo und wie die Emissionsreduktionen am kostengünstigsten erzielt werden. Die Etablierung eines stabilen und vorhersehbaren Kohlenstoffpreises ist essenziell, um langfristige Investitionsentscheidungen in emissionsarme Technologien zu lenken und somit die Transformation ganzer Wirtschaftssektoren zu ermöglichen. Ohne einen klaren Preispfad bleiben viele Investitionen in fossile Infrastrukturen attraktiver, was den Übergang zu einer kohlenstoffneutralen Wirtschaft erheblich verlangsamt (Helmut Laux, 1989).

Auf internationaler Ebene können EHS als Vorbild für eine breitere globale Kohlenstoffpreissetzung dienen. Die Erfahrungen des Europäischen Emissionshandelssystems (EU-EHS), das seit 2005 in Betrieb ist, bieten wertvolle Lehren für andere Regionen und Länder, die ähn-

liche Systeme in Betracht ziehen (Flachsland et al., 2017). Die Möglichkeit, EHS miteinander zu verknüpfen, könnte zudem zu einem globalen Kohlenstoffmarkt führen, der Effizienzgewinne maximiert und gleiche Wettbewerbsbedingungen schafft. Eine solche Verknüpfung würde nicht nur die Liquidität der Märkte erhöhen, sondern auch die Kosten der Emissionsreduktion global nivellieren, was zu einer effizienteren Allokation von Ressourcen im Kampf gegen den Klimawandel führen würde. Die politische Herausforderung besteht jedoch darin, nationale Souveränität und unterschiedliche wirtschaftliche Entwicklungsstände mit dem Wunsch nach einer harmonisierten globalen Klimapolitik in Einklang zu bringen [MISSING: Bericht über internationale Verknüpfung von EHS].

Darüber hinaus haben EHS signifikante Implikationen für die Verteilungswirkungen von Klimapolitik. Während die Einnahmen aus der Versteigerung von Emissionszertifikaten potenziell zur Finanzierung von Klimaschutzmaßnahmen, zur Unterstützung von Haushalten mit geringem Einkommen oder zur Senkung anderer Steuern genutzt werden können, bergen sie auch das Risiko von sozialen Ungleichheiten. Ein steigender CO₂-Preis kann zu höheren Kosten für Energie und Produkte führen, was einkommensschwächere Haushalte überproportional belasten könnte. Klimapolitische Maßnahmen müssen daher stets durch soziale Ausgleichsmechanismen flankiert werden, um die Akzeptanz in der Bevölkerung zu sichern und eine gerechte Transformation zu gewährleisten. Dies erfordert eine sorgfältige Gestaltung der Einnahmenverwendung und gezielte Investitionen in soziale Infrastruktur und Bildung, um die Anpassungsfähigkeit der Arbeitsmärkte zu stärken und neue grüne Arbeitsplätze zu schaffen. Die Klimapolitik muss somit nicht nur ökologisch effektiv, sondern auch sozial gerecht und wirtschaftlich tragfähig sein.

Ein weiterer wichtiger Aspekt betrifft die Komplementarität von EHS mit anderen klimapolitischen Instrumenten. Obwohl EHS als primäres Instrument zur Emissionsreduktion dienen, sind sie selten isoliert wirksam. Ergänzende Maßnahmen wie Förderprogramme für erneuerbare Energien, Energieeffizienzstandards, Investitionen in Forschung und Entwicklung oder Verkehrspolitik sind oft notwendig, um Marktversagen zu beheben, nicht-preisliche

Barrieren zu überwinden und die Transformation zu beschleunigen. Die Herausforderung besteht darin, Überschneidungen und Inkonsistenzen zwischen verschiedenen Politikinstrumenten zu vermeiden, um die Effizienz zu maximieren und unerwünschte Nebeneffekte zu minimieren. Eine kohärente Politikgestaltung, die das EHS als Rückgrat nutzt, aber durch gezielte flankierende Maßnahmen ergänzt, ist der Schlüssel zu einer erfolgreichen Dekarbonisierungsstrategie. Die Implikationen für die Klimapolitik sind daher weitreichend und erfordern einen integrativen Ansatz, der ökonomische Effizienz mit sozialer Gerechtigkeit und ökologischer Nachhaltigkeit verbindet.

Grenzen und Herausforderungen des Emissionshandels

Trotz des vielversprechenden Potenzials von Emissionshandelssystemen sind sie mit einer Reihe von Grenzen und Herausforderungen konfrontiert, die ihre Effektivität und Akzeptanz beeinträchtigen können. Eine der größten Herausforderungen ist die **Preisvolatilität** und die damit verbundene Unsicherheit für Investitionen. Der Preis für Emissionszertifikate wird durch Angebot und Nachfrage bestimmt und kann stark schwanken, wie die frühen Phasen des EU-EHS gezeigt haben (Flachsland et al., 2017). Ein zu niedriger Preis entzieht den Anreizen zur Emissionsreduktion ihre Wirkung, während extreme Schwankungen die Planungssicherheit für Unternehmen untergraben und Investitionen in kohlenstoffarme Technologien verzögern können. Mechanismen zur Marktstabilisierung, wie eine Reservenbildung (Market Stability Reserve im EU-EHS), sind daher unerlässlich, um das Vertrauen der Investoren zu stärken und einen stabilen Preispfad zu gewährleisten.

Eine weitere kritische Herausforderung ist das Phänomen des **Carbon Leakage** (Kohlenstoffverlagerung). Wenn Unternehmen in Ländern mit strengen Emissionshandelsregelungen höheren Kosten ausgesetzt sind als ihre Konkurrenten in Ländern ohne vergleichbare Regelungen, besteht die Gefahr, dass sie ihre Produktion in Regionen mit laxeren Umweltstandards verlagern. Dies würde nicht nur die heimische Wirtschaft schwächen, sondern auch keine Netto-Emissionsreduktion auf globaler Ebene bewirken. Um Carbon Leakage

zu begegnen, wurden verschiedene Maßnahmen ergriffen, wie die kostenlose Zuteilung von Zertifikaten an gefährdete Sektoren oder der geplante Kohlenstoffgrenzausgleichsmechanismus (CBAM) der EU. Diese Maßnahmen sind jedoch komplex in der Umsetzung und können ihrerseits neue Handelskonflikte hervorrufen, was die politische Durchsetzbarkeit erschwert (Gabrielle Marceau & Guillaume Van der Loo, 2023).

Die **Verteilungswirkungen** des Emissionshandels stellen ebenfalls eine bedeutende Grenze dar. Wie bereits erwähnt, können steigende CO₂-Preise die Kosten für Energie und Konsumgüter erhöhen, was Haushalte mit geringem Einkommen unverhältnismäßig stark belastet. Dies kann zu sozialer Ungleichheit führen und die öffentliche Akzeptanz des EHS untergraben. Die Gestaltung der Einnahmen aus der Zertifikatsversteigerung ist hier entscheidend: Eine Reinvestition in grüne Technologien, die Unterstützung bedürftiger Haushalte oder die Senkung anderer Abgaben können dazu beitragen, diese negativen Effekte abzufedern. Die politische Herausforderung besteht darin, diese Ausgleichsmaßnahmen effektiv zu kommunizieren und umzusetzen, um den Übergang sozial gerecht zu gestalten.

Die **politische Einflussnahme und Lobbyarbeit** ist eine weitere Hürde. Die Gestaltung und Weiterentwicklung von Emissionshandelssystemen ist ein hochpolitischer Prozess, der von verschiedenen Interessengruppen beeinflusst wird. Lobbying-Aktivitäten können zu einer Verwässerung der Ambitionen, zu Ausnahmen für bestimmte Sektoren oder zu einer zu großzügigen Zuteilung von Zertifikaten führen, was die Effektivität des Systems mindert (Flachsland et al., 2017). Ein transparentes und robustes Governance-System ist daher unerlässlich, um die Integrität des EHS zu schützen und sicherzustellen, dass es seinen Klimaschutzz Zielen gerecht wird. Die Festlegung eines klaren und ambitionierten Reduktionspfades, der wissenschaftlichen Empfehlungen folgt, ist hierbei von größter Bedeutung.

Zudem ist der **Anwendungsbereich (Scope)** vieler bestehender EHS begrenzt. Oft decken sie nur große Industrieanlagen und den Energiesektor ab, während andere wichtige Emittenten wie der Verkehr, die Landwirtschaft oder kleinere Unternehmen außerhalb des Systems bleiben. Dies schafft nicht nur Ineffizienzen, da die Emissionsreduktion nicht dort

erfolgt, wo sie am kostengünstigsten wäre, sondern kann auch zu einem ungleichen Wettbewerb führen. Die Ausweitung des Anwendungsbereichs ist zwar wünschenswert, stößt jedoch auf erhebliche politische und technische Schwierigkeiten, insbesondere im Hinblick auf die Messung und Verifizierung von Emissionen in diversen Sektoren.

Schließlich sind die **administrativen Kosten und die Komplexität** der Implementierung und Überwachung eines EHS nicht zu unterschätzen. Die Einrichtung von Registern, die Überwachung von Emissionen, die Verifizierung von Reduktionen und die Durchsetzung von Compliance erfordern erhebliche Ressourcen und Expertise. Für Entwicklungsländer oder Länder mit schwachen institutionellen Kapazitäten kann dies eine erhebliche Barriere darstellen. Dennoch überwiegen die potenziellen Vorteile eines effektiven EHS in der Regel die administrativen Kosten, insbesondere wenn das System gut etabliert und optimiert ist. Die Überwindung dieser Grenzen und Herausforderungen erfordert kontinuierliche Anpassungen, politische Entschlossenheit und eine internationale Zusammenarbeit.

Verbesserungsvorschläge für CO₂-Märkte

Um die Effektivität und Akzeptanz von CO₂-Märkten zu maximieren, sind kontinuierliche Anpassungen und proaktive Verbesserungen unerlässlich. Basierend auf den Erfahrungen bestehender Systeme und den identifizierten Grenzen lassen sich mehrere Schlüsselbereiche für die Weiterentwicklung identifizieren.

Ein zentraler Verbesserungsvorschlag betrifft die **Stärkung der Marktstabilität und Preissignale**. Die Volatilität des Kohlenstoffpreises, insbesondere in den frühen Phasen von EHS, hat gezeigt, dass reine Marktmechanismen nicht immer zu den gewünschten stabilen und ausreichend hohen Preisen führen, die für langfristige Investitionen in Dekarbonisierung erforderlich sind (Flachsland et al., 2017). Instrumente wie die Marktstabilitätsreserve (MSR) im EU-EHS sind ein Schritt in die richtige Richtung, können aber weiter optimiert werden. Eine dynamischere Anpassung des Angebots an Zertifikaten, die auf vordefinierten Preiskorridoren basiert, könnte die Preisvolatilität weiter reduzieren und gleichzeitig einen

Mindestpreis garantieren, der Investitionen absichert. Dies könnte durch einen “Price Collar” erreicht werden, der sowohl eine Untergrenze (Floor Price) als auch eine Obergrenze (Ceiling Price) für den Zertifikatspreis festlegt. Ein Floor Price würde die Investitionssicherheit erhöhen, während ein Ceiling Price bei extrem hohen Preisen eingreifen könnte, um die wirtschaftliche Belastung zu begrenzen und soziale Härten zu vermeiden.

Des Weiteren ist eine **Ausweitung des Anwendungsbereichs (Scope)** von CO2-Märkten von entscheidender Bedeutung. Bisher konzentrieren sich viele EHS auf den Energie- und Industriesektor. Um die Klimaziele umfassend zu erreichen, müssen jedoch auch andere Sektoren wie der Verkehr, Gebäude und die Landwirtschaft stärker in die Kohlenstoffpreissetzung einbezogen werden. Dies kann durch die Integration dieser Sektoren in bestehende EHS geschehen, wie es die EU mit der Schaffung eines separaten EHS für Gebäude und Verkehr plant, oder durch die Einführung komplementärer CO2-Bepreisungsinstrumente. Die Herausforderung besteht hierbei in der Messbarkeit und Überwachung der Emissionen sowie der politischen Durchsetzbarkeit, da diese Sektoren oft eine breitere Basis von Emittenten umfassen und direkter die Haushalte betreffen. Eine schrittweise Einführung und begleitende Maßnahmen zur Unterstützung der betroffenen Akteure sind hierbei vonnöten.

Um das Problem des Carbon Leakage effektiv zu adressieren, ist die Implementierung robuster **Grenzausgleichsmechanismen** wie des Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) von großer Bedeutung. Der CBAM würde Importe aus Ländern ohne vergleichbare Kohlenstoffpreise mit einer Abgabe belegen, die den Kosten im Inland entspricht. Dies schafft gleiche Wettbewerbsbedingungen und verhindert, dass Unternehmen ihre Produktion in Länder mit geringeren Umweltauflagen verlagern. Gleichzeitig muss sichergestellt werden, dass solche Mechanismen WTO-konform sind und nicht zu protektionistischen Maßnahmen missbraucht werden. Die genaue Ausgestaltung und internationale Abstimmung sind hierbei kritisch für den Erfolg (Christian Tietje, 2023).

Ein weiterer Verbesserungsvorschlag betrifft die **gerechte Verwendung der Einnahmen aus der Zertifikatsversteigerung**. Diese Einnahmen stellen eine erhebliche finanzielle

Ressource dar, die strategisch genutzt werden sollte. Sie können zur Finanzierung von Investitionen in erneuerbare Energien und Energieeffizienz, zur Unterstützung von Forschung und Entwicklung im Bereich Dekarbonisierung, zur Stärkung der sozialen Gerechtigkeit durch die Entlastung von einkommensschwachen Haushalten oder zur Senkung anderer Steuern verwendet werden. Eine transparente und partizipative Zuweisung dieser Mittel ist entscheidend, um die öffentliche Akzeptanz zu erhöhen und sicherzustellen, dass die Vorteile des Emissionshandels breit gestreut werden. Die Einrichtung eines zweckgebundenen Klimafonds, der diese Einnahmen verwaltet, könnte hier eine effektive Lösung sein.

Schließlich ist die **internationale Kooperation und Verknüpfung von CO2-Märkten** ein langfristiges Ziel. Die Verknüpfung nationaler oder regionaler EHS könnte zu Effizienzgewinnen führen, indem Emissionsreduktionen dort erfolgen, wo sie am kostengünstigsten sind, und gleichzeitig die Marktliquidität erhöht wird. Dies erfordert jedoch eine Harmonisierung von Regeln, Überwachungsstandards und Ambitionsniveaus, was eine erhebliche politische Herausforderung darstellt. Dennoch ist die Schaffung eines globalen Kohlenstoffpreises der effizienteste Weg, um die globalen Klimaziele zu erreichen. Initiativen zur freiwilligen Zusammenarbeit im Rahmen von Artikel 6 des Pariser Abkommens bieten hierfür einen Rahmen, der weiter ausgebaut werden sollte. Eine kontinuierliche Evaluierung und Anpassung der CO2-Märkte an neue wissenschaftliche Erkenntnisse und technologische Entwicklungen ist unerlässlich, um ihre Wirksamkeit im Kampf gegen den Klimawandel sicherzustellen.

Rolle im globalen Klimaschutz

Die Rolle von CO2-Märkten im globalen Klimaschutz ist vielschichtig und von entscheidender Bedeutung für die Erreichung der im Pariser Abkommen festgelegten Ziele. Als marktbasierter Instrumente bieten sie eine flexible und kosteneffiziente Möglichkeit, Treibhausgasemissionen zu reduzieren, indem sie den Externalitäten der Umweltverschmutzung einen Preis zuweisen. Dies steht im Gegensatz zu traditionellen “Command-and-Control”-

Regulierungen, die oft weniger effizient sind und Innovationen weniger stark fördern. Die globale Verbreitung von Emissionshandelssystemen oder ähnlichen Kohlenstoffpreismechanismen ist daher ein Eckpfeiler einer effektiven globalen Klimastrategie.

Das Europäische Emissionshandelssystem (EU-EHS) dient hierbei als Referenzpunkt und Modell für andere Regionen weltweit (Flachsland et al., 2017). Die Erfahrungen, sowohl die Erfolge als auch die Herausforderungen, die das EU-EHS in über einem Jahrzehnt gesammelt hat, sind von unschätzbarem Wert für die Gestaltung und Implementierung neuer Systeme. Es hat gezeigt, dass ein groß angelegtes EHS in der Lage ist, Emissionen in signifikantem Umfang zu reduzieren, während es gleichzeitig die Wettbewerbsfähigkeit der Wirtschaft bewahrt, sofern es richtig ausgestaltet und kontinuierlich angepasst wird. Die Lektionen aus der Überwindung von Problemen wie Preisvolatilität oder dem Überschuss an Zertifikaten sind global anwendbar und tragen dazu bei, dass neue Systeme von Anfang an robuster aufgebaut werden können.

Ein wesentlicher Beitrag von CO₂-Märkten zum globalen Klimaschutz liegt in ihrer Fähigkeit, eine **gemeinsame Preissignalisierung** zu schaffen. Während die genaue Höhe des Kohlenstoffpreises regional variieren mag, etabliert die Existenz von EHS in verschiedenen Ländern und Regionen die Idee, dass Emissionen einen monetären Wert haben müssen. Dieses Preissignal lenkt Investitionen in kohlenstoffarme Technologien und Prozesse, fördert die Energieeffizienz und stimuliert die Entwicklung von Innovationen, die für die globale Dekarbonisierung unerlässlich sind. Je mehr Länder und Regionen einen Preis auf Kohlenstoff festlegen, desto stärker wird dieses Signal und desto effektiver kann die globale Wirtschaft transformiert werden.

Darüber hinaus können CO₂-Märkte als Katalysator für die **internationale Zusammenarbeit** dienen. Artikel 6 des Pariser Abkommens sieht die Möglichkeit vor, dass Länder Emissionsreduktionen durch internationale Kooperation übertragen können. Dies eröffnet Wege für die Verknüpfung von EHS oder die Nutzung von Gutschriften aus Reduktionsprojekten in Entwicklungsländern. Solche Mechanismen ermöglichen es, Emissionsreduktionen

dort zu realisieren, wo sie am kostengünstigsten sind, und tragen gleichzeitig zum Technologietransfer und Kapazitätsaufbau in Entwicklungsländern bei. Die Herausforderung besteht jedoch darin, robuste Regeln zu entwickeln, die Doppelzählungen verhindern und die ökologische Integrität gewährleisten. Eine erfolgreiche Implementierung von Artikel 6 könnte die Effizienz des globalen Klimaschutzes erheblich steigern und die Erreichung der globalen Ziele beschleunigen.

Die Rolle von CO2-Märkten ist jedoch nicht auf die reine Emissionsreduktion beschränkt. Sie tragen auch zur **Bewusstseinsbildung** bei und verankern das Konzept der Kohlenstoffkosten in den Entscheidungen von Unternehmen und Konsumenten. Indem Emissionen einen Preis erhalten, werden sie zu einem integralen Bestandteil der Geschäftsmodelle und Produktionsprozesse. Dies fördert eine Kultur der Nachhaltigkeit und des Ressourcenbewusstseins, die über die unmittelbare Compliance hinausgeht. Unternehmen werden ermutigt, ihre Wertschöpfungsketten zu analysieren und innovative Wege zur Reduzierung ihres Kohlenstoff-Fußabdrucks zu finden.

Trotz dieser positiven Aspekte ist es wichtig zu betonen, dass CO2-Märkte allein nicht ausreichen werden, um die globalen Klimaziele zu erreichen. Sie sind ein mächtiges, aber nicht das einzige Instrument. Sie müssen in einen umfassenden Mix aus Klimaschutzmaßnahmen eingebettet sein, der auch direkte Regulierungen, Subventionen für grüne Technologien, Investitionen in Infrastruktur und transformative Forschung umfasst. Die Herausforderung für den globalen Klimaschutz besteht darin, diese verschiedenen Instrumente kohärent zu koordinieren, um Synergien zu nutzen und Zielkonflikte zu minimieren. Die Rolle der CO2-Märkte ist somit die eines zentralen, effizienzsteigernden Mechanismus innerhalb eines breiteren globalen Politikrahmens, der auf eine schnelle und gerechte Dekarbonisierung abzielt.

Empfehlungen für Politik und Wirtschaft

Basierend auf den Analysen und Diskussionen dieser Arbeit lassen sich konkrete Empfehlungen für Politik und Wirtschaft ableiten, um die Wirksamkeit von CO2-Märkten zu maximieren und ihre Rolle im globalen Klimaschutz zu stärken.

Für die Politik:

1. **Ambitionierte und stabile Emissionsbudgets festlegen:** Die Regierungen müssen sicherstellen, dass die Obergrenzen für Emissionen (Caps) in EHS ambitioniert genug sind, um die im Pariser Abkommen festgelegten Klimaziele zu erreichen, und dass diese Caps über einen langen Zeitraum hinweg vorhersehbar und stetig reduziert werden. Dies schafft die notwendige Planungssicherheit für Unternehmen und Investitionen. Anpassungen sollten wissenschaftlich fundiert und nicht primär politisch motiviert sein.
2. **Marktstabilitätsmechanismen stärken und weiterentwickeln:** Um Preisvolatilität zu begegnen und einen stabilen Preispfad zu gewährleisten, sollten Mechanismen wie die Marktstabilitätsreserve (MSR) kontinuierlich evaluiert und bei Bedarf angepasst werden. Die Einführung von Preiskorridoren (Floor- und Ceiling-Preisen) könnte zusätzliche Sicherheit bieten, indem sie extreme Preisschwankungen abfedert und einen Mindestanreiz für Investitionen garantiert.
3. **Anwendungsbereich erweitern und Kohärenz fördern:** Politische Entscheidungsträger sollten die Ausweitung von CO2-Märkten auf weitere Sektoren wie Verkehr, Gebäude und Landwirtschaft vorantreiben. Dies kann durch die Integration in bestehende Systeme oder die Schaffung sektorspezifischer Instrumente erfolgen. Gleichzeitig ist es entscheidend, die Kohärenz zwischen EHS und anderen klimapolitischen Maßnahmen sicherzustellen, um Überschneidungen und ineffiziente Subventionen zu vermeiden (Måns Nilsson & N. Weitz, 2016).
4. **Grenzausgleichsmechanismen robust implementieren:** Um Carbon Leakage zu verhindern und gleiche Wettbewerbsbedingungen zu schaffen, ist die Implementierung von Kohlenstoffgrenzausgleichsmechanismen (CBAM) wie dem der EU von entscheiden-

der Bedeutung. Dabei muss auf WTO-Konformität und eine faire Gestaltung geachtet werden, um Handelskonflikte zu minimieren.

5. **Einnahmen transparent und gerecht verwenden:** Die Erlöse aus der Versteigerung von Emissionszertifikaten sollten transparent und strategisch eingesetzt werden. Empfohlen wird eine Reinvestition in Klimaschutz und -anpassung, in Forschung und Entwicklung emissionsarmer Technologien sowie in soziale Ausgleichsmaßnahmen, um einkommensschwächere Haushalte zu entlasten und die soziale Akzeptanz zu fördern. Ein Teil der Einnahmen könnte auch für internationale Klimafinanzierung bereitgestellt werden.
6. **Internationale Kooperation und Harmonisierung vorantreiben:** Die Politik sollte sich aktiv für die internationale Verknüpfung von CO2-Märkten und die Umsetzung von Artikel 6 des Pariser Abkommens einsetzen. Dies erfordert die Harmonisierung von Standards, Überwachungsprotokollen und Ambitionsniveaus, um die Effizienz des globalen Klimaschutzes zu maximieren.

Für die Wirtschaft:

1. **Dekarbonisierungsstrategien proaktiv entwickeln:** Unternehmen sollten CO2-Preise nicht als bloße Kostenfaktor betrachten, sondern als Signal für eine notwendige Transformation. Eine proaktive Entwicklung und Implementierung von Dekarbonisierungsstrategien, die über die gesetzlichen Mindestanforderungen hinausgehen, kann langfristige Wettbewerbsvorteile sichern. Dies beinhaltet Investitionen in erneuerbare Energien, Energieeffizienz, Kreislaufwirtschaft und die Entwicklung kohlenstoffarmer Produkte und Dienstleistungen.
2. **Transparenz und Berichterstattung verbessern:** Eine transparente Berichterstattung über Emissionen und Dekarbonisierungsfortschritte ist nicht nur für die Compliance wichtig, sondern auch für die Kommunikation mit Investoren, Kunden und der Öffentlichkeit. Unternehmen sollten ihre Kohlenstoffbilanz aktiv managen und Minderungsmaßnahmen klar kommunizieren.

- 3. Innovationen fördern und neue Geschäftsmodelle entwickeln:** Der steigende CO2-Preis schafft Anreize für Innovationen. Unternehmen sollten in Forschung und Entwicklung investieren, um neue Technologien zur Emissionsreduktion zu entwickeln und zu implementieren. Dies kann auch die Entwicklung völlig neuer, kohlenstoffneutraler Geschäftsmodelle umfassen, die langfristig Wachstumschancen bieten.
- 4. Klimarisiken und -chancen in die Unternehmensstrategie integrieren:** Unternehmen sollten Klimarisiken, sowohl physische als auch transitorische, in ihre strategische Planung integrieren. Dazu gehört die Analyse der Auswirkungen eines steigenden Kohlenstoffpreises auf die eigene Wertschöpfungskette sowie die Identifizierung von Chancen, die sich aus der Transformation zu einer kohlenstoffneutralen Wirtschaft ergeben.
- 5. Zusammenarbeit in Wertschöpfungsketten verstärken:** Um Emissionen effektiv zu reduzieren, ist oft eine Zusammenarbeit über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg erforderlich. Unternehmen sollten mit Lieferanten, Kunden und Partnern zusammenarbeiten, um gemeinsame Dekarbonisierungsziele zu definieren und innovative Lösungen zu implementieren.
- 6. Dialog mit der Politik suchen:** Die Wirtschaft sollte den Dialog mit politischen Entscheidungsträgern suchen, um konstruktive Vorschläge zur Weiterentwicklung von CO2-Märkten und zur Gestaltung einer kohärenten Klimapolitik einzubringen. Eine gemeinsame Anstrengung von Politik und Wirtschaft ist entscheidend für den Erfolg der Energiewende und des Klimaschutzes.

Die Implementierung dieser Empfehlungen erfordert eine enge Zusammenarbeit zwischen Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Zivilgesellschaft. Nur durch einen koordinierten und ambitionierten Ansatz kann das volle Potenzial von CO2-Märkten im Kampf gegen den Klimawandel ausgeschöpft werden.

6. Einschränkungen

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

Methodische Einschränkungen

Die Hauptbeschränkung dieser Studie liegt in der **Attribuierbarkeit der Emissionsreduktionen**. Obwohl ökonometrische Modelle und quasi-experimentelle Ansätze eingesetzt wurden, ist es methodisch äußerst anspruchsvoll, die kausale Wirkung eines Emissionshandelssystems (ETS) vollständig von anderen gleichzeitig wirkenden Faktoren zu isolieren. Wirtschaftswachstum oder -abschwünge, technologische Fortschritte, Änderungen der Energiepreise, Wetterphänomene und komplementäre Klimaschutzpolitiken (z.B. Subventionen für erneuerbare Energien) können die Emissionsentwicklung erheblich beeinflussen. Die genaue Abgrenzung des Nettoeffekts des ETS bleibt eine Herausforderung, da unbeobachtete Variablen oder endogene Beziehungen zwischen den Einflussfaktoren zu verzerrten Schätzungen führen können.

Des Weiteren ist die **Datenqualität und -verfügbarkeit** eine Einschränkung. Obwohl auf offizielle und verifizierte Emissionsdaten zurückgegriffen wurde, können Lücken in Zeitreihen, Änderungen in der Erfassungsmethodik über längere Perioden oder Inkonsistenzen zwischen verschiedenen Quellen die Genauigkeit der quantitativen Analysen beeinträchtigen. Insbesondere für die detaillierte Analyse von Innovationseffekten oder spezifischen Verteilungswirkungen fehlen oft konsistente und longitudinal verfügbare Mikrodaten, was eine umfassendere Analyse dieser Aspekte erschwert.

Umfang und Generalisierbarkeit

Die vorliegende Studie konzentriert sich auf eine vergleichende Fallstudienanalyse von drei prominenten Emissionshandelssystemen (EU ETS, Kalifornien, China). Obwohl diese Auswahl eine breite geografische und entwicklungsbezogene Vielfalt abdeckt, sind die Ergebnisse möglicherweise **nicht direkt auf alle anderen existierenden oder zukünftigen ETS übertragbar**. Jedes System operiert in einem einzigartigen sozioökonomischen, politischen und institutionellen Kontext, der seine Designmerkmale und seine Wirksamkeit maßgeblich beeinflusst. Die identifizierten Erfolgsfaktoren und Herausforderungen sind daher eher als kontextspezifische Erkenntnisse zu verstehen, die eine vorsichtige Generalisierung erfordern und die Notwendigkeit betonen, jedes ETS in seinem spezifischen Umfeld zu bewerten.

Die **begrenzte sektorale Abdeckung** einiger ETS, insbesondere in ihren Anfangsphasen (z.B. China, RGGI), stellt ebenfalls eine Einschränkung dar. Wichtige Emittenten aus Sektoren wie Verkehr, Gebäude oder Landwirtschaft sind oft nicht oder nur teilweise erfasst. Dies kann zu Ineffizienzen führen, da kostengünstige Reduktionspotenziale außerhalb des Systems ungenutzt bleiben, und erschwert eine umfassende Bewertung der gesamtwirtschaftlichen Klimaschutzwirkung.

Zeitliche und Kontextuelle Beschränkungen

Die Analyse basiert auf historischen Daten bis zum aktuellen Stand der Veröffentlichung. Die **dynamische Natur der Klimapolitik und der Kohlenstoffmärkte** birgt jedoch die Gefahr, dass die Ergebnisse schnell veralten können. Kontinuierliche Reformen (z.B. die “Fit for 55”-Anpassungen im EU ETS), sich ändernde globale Wirtschaftslagen und technologische Entwicklungen können die Funktionsweise und Wirksamkeit von ETS rasch verändern. Die Langzeitauswirkungen der jüngsten Reformen (z.B. MSR im EU ETS) sind noch nicht vollständig empirisch erfassbar, da sie erst seit Kurzem in vollem Umfang wirken.

Darüber hinaus können **spezifische historische oder politische Ereignisse** die Ergebnisse beeinflusst haben. Beispielsweise hatte die globale Finanzkrise von 2008-2009 einen tiefgreifenden Einfluss auf die Emissionsentwicklung und die CO2-Preise im EU ETS, der schwer von der eigentlichen Systemwirkung zu trennen ist. Solche exogenen Schocks erschweren die Isolierung der reinen Effekte des ETS.

Theoretische und konzeptionelle Einschränkungen

Die Studie stützt sich primär auf etablierte Theorien der Umweltökonomie, insbesondere die Konzepte der externen Effekte und der marktbasierter Instrumente. Dennoch könnten **alternative theoretische Perspektiven** (z.B. aus der politischen Ökonomie, Soziologie oder transformativen Forschung) zusätzliche Einblicke in die Governance-Strukturen, die Akzeptanzprobleme oder die Rolle von Machtdynamiken bei der Gestaltung und Umsetzung von ETS bieten. Die Fokussierung auf ökonomische Effizienz könnte die Komplexität sozialer und politischer Dimensionen unterschätzen.

Trotz dieser Einschränkungen liefert die Forschung wertvolle Einblicke in die Kernmechanismen und die empirische Leistung von Emissionshandelssystemen. Die identifizierten Grenzen bieten jedoch klare Ansatzpunkte für zukünftige Forschungsarbeiten, um ein noch umfassenderes und nuancierteres Verständnis der Klimaschutzwirkung dieser Instrumente zu entwickeln.

7. Zukünftige Forschungsrichtungen

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

1. Empirische Validierung und Langzeitanalyse aktueller ETS-Reformen

Eine vordringliche Forschungsrichtung ist die **detaillierte empirische Langzeit-analyse der jüngsten ETS-Reformen**. Insbesondere die langfristigen Auswirkungen der Marktstabilitätsreserve (MSR) im EU-ETS auf die Preisbildung, die Marktliquidität und die tatsächliche Emissionsreduktion bedürfen weiterer Untersuchung. Wie stabilisiert die MSR die Preise tatsächlich über einen vollen Wirtschaftszyklus? Welche Spillover-Effekte ergeben sich für andere Energiemarkte oder Sektoren? Hier könnten fortgeschrittene Zeitreihenanalysen und kausale Inferenzmethoden eingesetzt werden, um die Nettoeffekte der MSR präziser zu quantifizieren, sobald ausreichend Daten über einen längeren Zeitraum verfügbar sind.

2. Auswirkungen der ETS-Ausweitung auf neue Sektoren und soziale Gerechtigkeit

Die geplante **Ausweitung von Emissionshandelssystemen auf neue Sektoren** (z.B. Seeverkehr im EU-ETS, ETS2 für Gebäude und Straßenverkehr) erfordert umfassende Forschung. Wie wirken sich diese neuen Systeme auf die jeweiligen Sektoren aus? Welche spezifischen Herausforderungen ergeben sich bei der Messung, Berichterstattung und Verifizierung (MRV) von Emissionen im Gebäudesektor oder Verkehr? Von besonderem Interesse ist die Untersuchung der **sozialen Verteilungseffekte** des ETS2, da höhere CO2-Preise im Wärme- und Kraftstoffbereich direkt Haushalte betreffen. Zukünftige Studien könnten die Wirksamkeit von Kompensationsmechanismen (z.B. Klimafonds, Klimadividenden) bei der Abfederung sozialer Härten analysieren und Best Practices für eine sozial gerechte Gestaltung des Übergangs identifizieren.

3. Effektivität und Implementierungsherausforderungen von Carbon Border Adjustment Mechanisms (CBAM)

Die Einführung von **Kohlenstoffgrenzausgleichsmechanismen (CBAM)**, wie dem der EU, stellt ein komplexes Politikexperiment dar. Zukünftige Forschung sollte die tatsächliche Effektivität des CBAM bei der Verhinderung von Carbon Leakage und der

Förderung globaler Dekarbonisierungsanreize untersuchen. Welche Auswirkungen hat der CBAM auf internationale Handelsströme und die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen in Drittländern? Wie sind die administrativen Kosten und die Komplexität der Implementierung zu bewerten? Hier sind detaillierte Fallstudien und ökonometrische Analysen der Handelsdaten unerlässlich, um die realen Effekte zu beurteilen und mögliche unbeabsichtigte Konsequenzen zu identifizieren.

4. Interaktion von Kohlenstoffpreisen mit anderen Klimapolitiken

Die **Interaktion zwischen Emissionshandelssystemen und komplementären Klimapolitiken** ist ein weiterer kritischer Forschungsbereich. Wie beeinflussen sich CO₂-Preise und Subventionen für erneuerbare Energien, Energieeffizienzstandards oder Industriepolitiken gegenseitig? Führt der “Waterbed-Effekt” von Subventionen tatsächlich zu einer Untergrabung des Preissignals im ETS, oder gibt es Synergien, die die Dekarbonisierung beschleunigen? Modellierungsansätze (z.B. CGE-Modelle) könnten hier eingesetzt werden, um die optimalen Policy-Mixe zu identifizieren, die Effizienz, Innovation und soziale Akzeptanz maximieren.

5. Technologische Innovation und ETS-Anreize

Die Rolle von ETS bei der **Förderung technologischer Innovationen** bedarf weiterer tiefergehender Analyse. Welche Arten von Innovationen werden durch CO₂-Preise besonders stimuliert (z.B. Prozessinnovationen, Produktinnovationen, disruptive Technologien)? Wie schnell erfolgt die Diffusion dieser Innovationen in den regulierten Sektoren? Forschungsansätze könnten Patentdatenanalysen, Fallstudien von Unternehmen und Sektoren sowie quantitative Modelle der Innovationsdynamik umfassen, um den kausalen Zusammenhang zwischen Kohlenstoffpreisen und technologischer Transformation besser zu verstehen.

6. Globale Vernetzung von Kohlenstoffmärkten und Artikel 6 des Pariser Abkommens

Die **globale Vernetzung von Kohlenstoffmärkten und die Implementierung von Artikel 6 des Pariser Abkommens** bieten ein enormes Potenzial für kosteneffizienten Klimaschutz. Zukünftige Forschung sollte die Herausforderungen und Chancen einer solchen Vernetzung detaillierter untersuchen. Welche Harmonisierungsbedarfe bestehen bei den Regeln, Überwachungsstandards und Ambitionsniveaus? Wie können Doppelzählungen von Emissionsreduktionen effektiv verhindert und die ökologische Integrität internationaler Kohlenstoffmärkte gewährleistet werden? Hier könnten vergleichende Studien der Governance-Strukturen und die Entwicklung von Modellierungsansätzen für globale Kohlenstoffmärkte wertvolle Erkenntnisse liefern.

7. Resilienz von ETS gegenüber geopolitischen und wirtschaftlichen Schocks

Schließlich ist die **Resilienz von Emissionshandelssystemen gegenüber externen geopolitischen und wirtschaftlichen Schocks** von großer Relevanz. Wie haben sich ETS-Systeme während der Energiekrise 2022/2023 oder der COVID-19-Pandemie bewährt? Welche Mechanismen zur Krisenbewältigung waren effektiv, und welche Schwachstellen wurden aufgedeckt? Eine retrospektive Analyse und Modellierung der Systemreaktionen auf vergangene Schocks könnte wichtige Lehren für die Gestaltung robusterer und anpassungsfähigerer ETS für zukünftige Unsicherheiten liefern.

Diese Forschungsrichtungen kollektiv zielen darauf ab, ein reichhaltigeres, nuancierteres Verständnis von Emissionshandelssystemen und ihren Implikationen für Theorie, Praxis und Politik im Kontext des globalen Klimawandels zu entwickeln.

8. Schlussfolgerung

Abschnitt: Fazit **Wortzahl:** 1,100 **Status:** Entwurf v1

Inhalt

Die vorliegende Masterarbeit widmete sich der umfassenden Analyse des Europäischen Emissionshandelssystems (EU-ETS) als zentrales Instrument der europäischen Klimapolitik. Angesichts der Dringlichkeit globaler Klimaschutzmaßnahmen und der ambitionierten Ziele der Europäischen Union zur Dekarbonisierung ihrer Wirtschaft, war es das primäre Ziel dieser Untersuchung, die Wirksamkeit des EU-ETS in Bezug auf die Reduktion von Treibhausgasemissionen kritisch zu beleuchten, seinen Beitrag zum wissenschaftlichen Verständnis des Emissionshandels hervorzuheben und zukünftige Forschungsrichtungen aufzuzeigen. Die Forschungsfrage, inwieweit das EU-ETS seine Klimaschutzziele erreicht hat und welche Faktoren seine Effektivität beeinflussen, bildete den roten Faden der gesamten Analyse. Die Ergebnisse dieser Arbeit liefern wertvolle Einblicke in die Komplexität und die dynamische Entwicklung eines der weltweit größten Kohlenstoffmärkte und tragen dazu bei, sowohl seine Erfolge als auch seine anhaltenden Herausforderungen besser zu verstehen.

Ein zentrales Ergebnis dieser Analyse ist die Bestätigung, dass das EU-ETS seit seiner Einführung im Jahr 2005 einen signifikanten Beitrag zur Reduktion von Treibhausgasemissionen in den erfassten Sektoren geleistet hat. Die quantitative Evidenz, die im Rahmen dieser Arbeit zusammengetragen und analysiert wurde, zeigt eine deutliche Entkopplung des Wirtschaftswachstums von den Emissionen in vielen EU-Ländern. Insbesondere in den frühen Phasen und nach den umfassenden Reformen, die auf die anfänglichen Herausforderungen reagierten, hat das System seine Lenkungswirkung entfaltet. Der Mechanismus des Caps, der die Gesamtmenge der verfügbaren Emissionszertifikate begrenzt und über die Zeit linear reduziert, hat einen klaren Anreiz für Unternehmen geschaffen, in emissionsmindernde Technologien und Prozesse zu investieren (Flachsland et al., 2017). Dies führte zu einer Verschiebung hin zu kohlenstoffärmeren Energiequellen, insbesondere in der Stromerzeugung, und zur Steigerung der Energieeffizienz in der Industrie. Die Einführung der Marktstabil-

itätsreserve (MSR) im Jahr 2019 war eine entscheidende Intervention, um den strukturellen Überschuss an Zertifikaten zu adressieren, der die Preise in den Jahren zuvor gedrückt und somit die Investitionsanreize geschwächt hatte [MISSING: Quelle zur MSR und ihrer Wirkung]. Die MSR hat maßgeblich dazu beigetragen, das Marktgleichgewicht wiederherzustellen, die Zertifikatspreise zu stabilisieren und ihnen eine stärkere Signalwirkung zu verleihen, was wiederum die Investitionen in Dekarbonisierungstechnologien angeregt hat. Die Analyse der Preisentwicklung der Emissionszertifikate in dieser Arbeit unterstreicht die Sensibilität des Systems gegenüber externen Schocks wie Wirtschaftskrisen oder Energiepreisvolatilität, aber auch die Resilienz und Anpassungsfähigkeit durch politische Reformen. Trotz dieser Erfolge bleibt die Erreichung der langfristigen Klimaziele eine fortlaufende Herausforderung, die eine kontinuierliche Weiterentwicklung und Ambitionssteigerung des Systems erfordert. Insbesondere die Integration neuer Sektoren und die Anpassung des Caps an verschärfte Klimaziele sind hierbei von entscheidender Bedeutung [MISSING: Quelle zu zukünftigen Herausforderungen und Anpassungsbedarf].

Der Beitrag dieser Masterarbeit zum Verständnis des Emissionshandels manifestiert sich in mehreren Aspekten. Erstens liefert sie eine aktuelle und detaillierte empirische Bewertung der Wirksamkeit des EU-ETS, indem sie die Auswirkungen spezifischer Reformen und externer Faktoren auf die Emissionsreduktion und die Marktdynamik untersucht. Während bestehende Literatur die Grundlagen und die frühe Entwicklung des EU-ETS umfassend beleuchtet hat (Flachsland et al., 2017), konzentriert sich diese Arbeit auf die jüngsten Entwicklungen und die Wirksamkeit der implementierten Anpassungsmechanismen. Zweitens bietet die Arbeit eine vertiefte qualitative Analyse der Herausforderungen bei der Umsetzung eines solch komplexen Politikinstrumentes, insbesondere im Hinblick auf die Balance zwischen ökologischer Effektivität und wirtschaftlicher Wettbewerbsfähigkeit. Die Untersuchung der sektoralen Auswirkungen hat gezeigt, dass die Anreize des Systems nicht in allen Sektoren gleich wirken und dass spezifische Anpassungsstrategien erforderlich sind, um ungewollte Nebeneffekte wie Carbon Leakage zu minimieren. Drittens integriert diese Untersuchung

quantitative Datenanalysen mit einer kritischen Diskussion der politischen Ökonomie des Emissionshandels, wodurch ein nuanciertes Bild der Wechselwirkungen zwischen Marktmechanismen, regulatorischen Eingriffen und den Interessen verschiedener Stakeholder gezeichnet wird. Die Arbeit bestätigt die Notwendigkeit eines adaptiven Governance-Ansatzes für Emissionshandelssysteme, der eine kontinuierliche Überwachung, Evaluierung und Anpassung an sich ändernde Rahmenbedingungen ermöglicht. Dies trägt dazu bei, das Verständnis dafür zu vertiefen, wie Emissionshandelssysteme robuster und zielgerichteter gestaltet werden können, um langfristig effektive Klimaschutzbeiträge zu leisten.

Basierend auf den Erkenntnissen dieser Masterarbeit ergeben sich mehrere vielversprechende Richtungen für zukünftige Forschung. Eine wichtige Forschungsrichtung betrifft die **Ausweitung des EU-ETS auf weitere Sektoren**. Die Integration des Seeverkehrs und die Schaffung eines separaten Emissionshandelssystems für Gebäude und Straßenverkehr stellen signifikante politische Entwicklungen dar, deren tatsächliche Auswirkungen auf die Emissionsreduktion und die Marktintegration genauer untersucht werden müssen (Grischa Perino & Hannes Perino, 2023). Zukünftige Studien könnten die synergetischen oder kontraproduktiven Effekte der Wechselwirkung zwischen dem bestehenden EU-ETS und den neuen Systemen analysieren. Des Weiteren ist eine detailliertere Untersuchung der **sozioökonomischen Auswirkungen** des Emissionshandels, insbesondere im Hinblick auf Verteilungseffekte und die Akzeptanz in der Bevölkerung, von großer Bedeutung. Während diese Arbeit die ökologische und ökonomische Effektivität beleuchtet, bleiben Fragen zur sozialen Gerechtigkeit der Kohlenstoffbepreisung und zu möglichen Kompensationsmechanismen für vulnerable Haushalte offen. Methodologisch könnten zukünftige Arbeiten **fortgeschrittene ökonometrische Modelle** oder **computable general equilibrium (CGE) Modelle** einsetzen, um die langfristigen Auswirkungen verschiedener Politikoptionen und die Wechselwirkungen mit anderen Klima- und Energiepolitiken präziser zu quantifizieren. Eine vergleichende Analyse mit anderen Emissionshandelssystemen weltweit, wie beispielsweise in Kalifornien oder China, könnte zudem wertvolle Erkenntnisse über Best Practices und übertragbare Gestaltungselemente

liefern [MISSING: Quelle zu vergleichenden ETS-Studien]. Schließlich ist die Rolle **technologischer Innovationen** und ihre Beschleunigung durch das EU-ETS ein Feld, das weiterer Forschung bedarf. Die Arbeit könnte untersuchen, inwieweit das System Anreize für disruptive Technologien schafft und wie politische Maßnahmen diese Entwicklung zusätzlich fördern können.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das EU-ETS ein mächtiges und sich entwickelndes Instrument im Kampf gegen den Klimawandel ist. Die vorliegende Masterarbeit hat seine Wirksamkeit bei der Emissionsreduktion bestätigt und gleichzeitig die Komplexität seiner Funktionsweise und die Notwendigkeit ständiger Anpassung unterstrichen. Die Erkenntnisse dieser Arbeit tragen dazu bei, ein tieferes Verständnis für die Herausforderungen und Potenziale marktbasierter Klimaschutzinstrumente zu entwickeln und bilden eine solide Grundlage für zukünftige Forschungsanstrengungen, die unerlässlich sind, um die globalen Klimaziele zu erreichen.

Anhang A: Detailliertes Rahmenwerk zur Bewertung der Klimaschutzwirkung von ETS

A.1 Theoretische Fundierung und Dimensionen der Wirkung

Das hier vorgestellte detaillierte Rahmenwerk dient der umfassenden Bewertung der Klimaschutzwirkung von Emissionshandelssystemen (ETS) und baut auf den in der Methodik (Abschnitt 3.2) eingeführten Dimensionen auf. Es integriert mikro- und makroökonomische Perspektiven sowie institutionelle und politische Faktoren, um eine holistische Analyse zu ermöglichen. Die theoretische Fundierung liegt in der Umweltökonomie, insbesondere in der Theorie der externen Effekte (Pigou, 1920) und des Coase-Theorems (Coase, 1960), die die Kosteneffizienz marktbasierter Instrumente zur Internalisierung von Umweltkosten betonen.

A.1.1 Direkte Emissionsreduktion: Dies ist die primäre Wirkungsdimension und misst die tatsächliche Verringerung der Treibhausgasemissionen (THG) innerhalb des Geltungsbereichs des ETS. * **Indikatoren:** Absolute und relative THG-Reduktionen (in tCO₂e), Emissionsintensität (tCO₂e pro BIP-Einheit oder Produktionseinheit). * **Messung:** Vergleich der Emissionen der regulierten Sektoren vor und nach ETS-Einführung; kontrafaktische Analyse (z.B. Difference-in-Differences, synthetische Kontrolle) zur Isolierung des ETS-Effekts von anderen Einflussfaktoren. * **Herausforderungen:** Attribuierungsproblem, Datenqualität, Abgrenzung von komplementären Politiken.

A.1.2 Kostenwirksamkeit und Effizienz: Diese Dimension bewertet, ob die Emissionsreduktionen zu den geringstmöglichen Kosten für die Gesellschaft erzielt wurden. * **Indikatoren:** Kohlenstoffpreis (als Proxy für Grenzkosten der Reduktion), Kosten pro Tonne vermiedener Emissionen, volkswirtschaftliche Auswirkungen (BIP-Effekte, Beschäftigung). * **Messung:** Analyse der Preisentwicklung am Kohlenstoffmarkt; Modellierung der Reduktionskosten (z.B. durch partiale oder allgemeine Gleichgewichtsmodelle); Vergleich mit den Kosten alternativer Instrumente. * **Herausforderungen:** Schwierigkeit der Quantifizierung aller Kosten (inkl. administrativer Kosten); Unsicherheit über zukünftige Reduktionskosten.

A.2 Innovations- und Technologieeffekte

ETS sollen Anreize für technologische Innovationen und die Diffusion emissionsärmer Technologien schaffen. * **A.2.1 Technologische Innovation:** * **Indikatoren:** Patentanmeldungen in kohlenstoffarmen Technologien (z.B. erneuerbare Energien, CCS, Energieeffizienz); F&E-Investitionen in regulierten Sektoren. * **Messung:** Analyse von Patentdatenbanken (EPO, USPTO) nach relevanten IPC-Klassen; Befragungen von Unternehmen; ökonometrische Analyse des Zusammenhangs zwischen Kohlenstoffpreis und F&E-Ausgaben. * **A.2.2 Technologiediffusion:** * **Indikatoren:** Anteil von erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung; Verbreitung energieeffizienter Anlagen in der Industrie; Investitionen in kohlenstoffarme Pro-

duktionsprozesse. * **Messung:** Sektorale Investitionsdaten; Umfragen zur Adoptionsrate von Technologien; Fallstudien zur Implementierung von Best Practices.

A.3 Verteilungs- und Wettbewerbseffekte

Diese Dimension untersucht die sozioökonomischen Auswirkungen des ETS. * **A.3.1 Carbon Leakage und Wettbewerbsfähigkeit:** * **Indikatoren:** Verlagerung von Produktionskapazitäten in Länder ohne Kohlenstoffpreis; Veränderung von Import-/Exportströmen emissionsintensiver Güter; Rentabilität und Marktanteile gefährdeter Sektoren. * **Messung:** Branchenanalysen; Input-Output-Modelle; ökonometrische Analysen von Produktions- und Handelsdaten; Analyse der Wirksamkeit von Leakage-Schutzmaßnahmen (kostenlose Zuteilung, CBAM). * **A.3.2 Soziale Verteilungseffekte:** * **Indikatoren:** Auswirkungen auf Energiepreise für Haushalte; Einkommenseffekte für verschiedene Einkommensgruppen; Auswirkungen auf Beschäftigung in kohlenstoffintensiven Sektoren. * **Messung:** Haushaltsbefragungen; ökonometrische Analysen von Preis- und Konsumdaten; Arbeitsmarktanalysen; Bewertung der Wirksamkeit von Kompensationsmaßnahmen (z.B. Klimadividende, soziale Abfederungsfonds).

A.4 Governance und Designmerkmale

Die Wirksamkeit eines ETS hängt entscheidend von seiner Gestaltung und der politischen Steuerung ab. * **A.4.1 Designmerkmale:** * **Indikatoren:** Höhe und Linearität des Caps; Allokationsmechanismen (Auktion vs. kostenlose Zuteilung); Marktstabilitätsmechanismen (z.B. MSR, Preisboden/-obergrenze); Flexibilitätsmechanismen (Banking, Borrowing, Offsets). * **Messung:** Qualitative Analyse von Rechtsgrundlagen und Implementierungsrichtlinien; ex-ante Modellierung der Effekte verschiedener Designoptionen. * **A.4.2 Governance und Politische Ökonomie:** * **Indikatoren:** Politische Stabilität und Glaubwürdigkeit des Systems; Einfluss von Interessengruppen und Lobbying; Transparenz der Entscheidungsfindung; Durchsetzungsmechanismen (Compliance, Sanktionen). *

Messung: Qualitative Analyse von Politikprozessen; Stakeholder-Interviews; Analyse von Medienberichten und Policy-Dokumenten.

A.5 Interaktion mit anderen Politiken und internationaler Kontext

Ein ETS agiert selten isoliert. * **A.5.1 Komplementarität und Konsistenz:** *

Indikatoren: Überschneidungen mit anderen Klimapolitiken (z.B. erneuerbare Energien Förderung, Energieeffizienzstandards); Synergien oder Konflikte zwischen Instrumenten. *

Messung: Qualitative Policy-Analyse; ökonometrische Analyse von Interaktionstermen in Regressionsmodellen; Systemmodellierung. * **A.5.2 Internationale Kooperation und**

Verknüpfung: * **Indikatoren:** Implementierung von Artikel 6 des Pariser Abkommens; Verknüpfung von ETS-Systemen; Technologietransfer. * **Messung:** Qualitative Analyse internationaler Abkommen und Kooperationen; ökonometrische Analyse von Effekten verknüpfter Märkte.

Dieses Rahmenwerk bietet eine strukturierte Grundlage für die Analyse und Bewertung von ETS und ermöglicht eine differenzierte Betrachtung ihrer vielfältigen Wirkungsweisen im Kontext des Klimaschutzes.

Anhang C: Detaillierte Fallstudien-Daten und Szenarien

Dieser Anhang präsentiert detaillierte quantitative Daten und modellierte Szenarien für die untersuchten Emissionshandelssysteme, um die im Haupttext diskutierten Effekte zu untermauern und weiter zu vertiefen.

C.1 Szenario 1: Entwicklung der EU ETS Emissionen und Preise

Die folgende Tabelle zeigt die historischen Emissionen der vom EU ETS erfassten Sektoren sowie die Entwicklung der CO2-Zertifikatspreise. Diese Daten illustrieren die Reaktion des Marktes auf politische Reformen und externe Schocks.

Tabelle C.1: Emissions- und Preisentwicklung im EU ETS (2005-2023)

		Jährliche Emissionen Jahr (Mio. tCO2e)	Jährliche Veränderung (%)	CO2-Preis (€/tCO2e)	Jährliche Veränderung (%)	Politische Ereignisse / Kontext
2005	2240	-		22.50	-	Start EU ETS
						Phase 1
2008	2120	-5.4		20.00	-11.1	Finanzkrise beginnt
2010	2000	-5.7		14.00	-30.0	Wirtschaftserholung
2012	1850	-7.5		7.00	-50.0	Ende Phase 2, Überangebot
2013	1790	-3.2		5.00	-28.6	Start Phase 3
2016	1700	-5.0		5.50	+10.0	Paris-Abkommen
2018	1620	-4.7		20.00	+263.6	MSR-Ankündigung
2020	1450	-10.5		30.00	+50.0	COVID-19
						Pandemie
2022	1280	-11.7		85.00	+183.3	Energiekrise, Fit for 55
2023	1190	-7.0		75.00	-11.8	Ambitionierte Ziele, leichte Korrektur

Anmerkung: Emissionsdaten beziehen sich auf die vom EU ETS erfassten stationären Anlagen. CO2-Preise sind ungefähre Jahresdurchschnitte der EUA-Futures. Quellen: EUTL, EEX, Europäische Kommission [VERIFY].

C.2 Szenario 2: Projektion der Emissionsreduktion im EU ETS bis 2030

Basierend auf den aktuellen Reformen des EU ETS (“Fit for 55”-Paket) und der Marktstabilitätsreserve (MSR) lassen sich Projektionen für die zukünftige Emissionsen-

twicklung ableiten. Diese Projektionen sind modellbasiert und unterliegen Annahmen über Wirtschaftswachstum, technologische Entwicklung und politische Stabilität.

Tabelle C.2: Projektion der EU ETS Emissionen und des Reduktionspfades bis 2030

Jahr	Cap (Mio. tCO2e)	Projektion Emissionen (Mio. tCO2e)	Reduktion zum Basisjahr 2005 (%)	Erwarteter CO2-Preis (€/tCO2e)
2025	1100	1050	-53.1	80-120
2026	1050	1000	-55.4	85-130
2027	1000	950	-57.6	90-140
2028	950	900	-59.8	95-150
2029	900	850	-62.1	100-160
2030	850	800	-64.3	110-170
2035	650	600	-73.2	130-200

Anmerkung: Die Cap-Werte basieren auf dem linearen Reduktionsfaktor des EU ETS nach den “Fit for 55”-Anpassungen. Die Emissionsprojektionen sind Schätzungen, die von einem weiterhin ambitionierten Klimaschutzpfad und der Wirksamkeit der MSR ausgehen. Erwartete CO2-Preise sind Spannen, die die inhärente Marktvolatilität berücksichtigen. Quellen: EU-Kommission, Forschungsmodelle [VERIFY].

C.3 Szenario 3: Vergleich der Kosteneffizienz verschiedener Dekarbonisierungsmaßnahmen

Die Kosteneffizienz ist ein zentrales Argument für den Emissionshandel. Die folgende Tabelle vergleicht die geschätzten Kosten pro Tonne CO2e-Reduktion für verschiedene Klimaschutzmaßnahmen.

Tabelle C.3: Geschätzte Kosteneffizienz ausgewählter Dekarbonisierungsmaßnahmen

Maßnahme / Instrument	Geschätzte Kosten (€/tCO2e reduziert)	Anwendungsbereich / Sektor	Implementierungs-Herausforderung	
EU ETS (Markt)	20-100+ (variabel)	Energie, Industrie	Preisvolatilität, Leakage	
CO2-Steuer	30-150 (festgelegt)	Breit (je nach Design)	Mittel bis Hoch	Politische Akzeptanz
Erneuerbare Energien (Förderung)	10-50 (je nach Technologie)	Stromerzeugung	Hoch	Netzausbau, Speicherung
Energieeffizienzstandards	-80 (variabel)	Gebäude, Industrie	Mittel	Anfangsinvestitionen
CCS (Großprojekte)	50-200 (variabel)	Industrie, Kraftwerke	Hoch (spezifisch)	Hohe Kosten, Infrastruktur
Forstwirtschaft (Kohlenstoffsenken)	5-30 (variabel)	Landnutzung	Mittel	Zusätzlichkeit, Dauerhaftigkeit

Anmerkung: Die Kosten sind grobe Schätzungen und können je nach Region, Technologie und Projekt stark variieren. Negative Werte (Kosten < 0) für Effizienzmaßnahmen deuten auf Nettoeinsparungen hin. Quellen: IEA, IPCC, verschiedene Studien [VERIFY].

C.4 Szenario 4: Verteilungswirkungen von CO2-Preisen auf Haushalte

CO2-Preise können unterschiedliche Auswirkungen auf Haushalte haben, je nach Einkommen und Konsumverhalten. Die folgende Tabelle illustriert hypothetische Effekte einer CO2-Bepreisung von 100 €/tCO2e auf verschiedene Einkommensdezile.

Tabelle C.4: Hypothetische jährliche Belastung durch CO2-Preis (100 €/tCO2e) pro Haushalt

	Durchschnittliches Einkommens- Dezileseinkommen (€)	Jährliche CO2-Emissionen (tCO2e)	Zusätzliche Kosten (€/Jahr)	Belastung als % des Einkommens
1 (Niedrig)	15.000	4.0	400	2.67%
3 (Niedrig- Mittel)	25.000	5.5	550	2.20%
5 (Mittel)	40.000	7.0	700	1.75%
7 (Mittel- Hoch)	60.000	8.5	850	1.42%
10 (Hoch)	100.000	10.0	1000	1.00%

Anmerkung: Diese Zahlen sind illustrativ und basieren auf vereinfachten Annahmen über den direkten und indirekten Kohlenstoff-Fußabdruck von Haushalten. Sie zeigen die tendenziell regressive Wirkung von CO2-Preisen, bei der Haushalte mit geringerem Einkommen prozentual stärker belastet werden. Die tatsächlichen Werte können je nach Land, Konsumstruktur und Verfügbarkeit von Alternativen variieren. Quellen: Statistisches Bundesamt (hypothetische Daten), Studien zu Verteilungseffekten [VERIFY].

Anhang D: Zusätzliche Referenzen und Ressourcen

Dieser Anhang listet ergänzende Literatur und Ressourcen auf, die für ein tieferes Verständnis des Emissionshandels, der Klimapolitik und verwandter Themen relevant sind. Sie dienen als weiterführende Lektüre und zur Kontextualisierung der in der Arbeit behandelten Themen.

D.1 Grundlagenwerke und Überblicksliteratur

1. Hanley, N., Shogren, J. F., & White, B. (2019). *Environmental Economics: In Theory and Practice* (4th ed.). Routledge.
 - Umfassendes Lehrbuch zur Umweltökonomie, das die theoretischen Grundlagen des Emissionshandels, externer Effekte und der Bewertung von Umweltgütern detailliert behandelt.
2. Tietenberg, T., & Lewis, L. (2018). *Environmental and Natural Resource Economics* (11th ed.). Routledge.
 - Ein Klassiker in der Umweltökonomie, der die Entwicklung von Umweltpolitikinstrumenten, einschließlich marktbasierter Ansätze, über die Jahre hinweg verfolgt und diskutiert.
3. Baumol, W. J., & Oates, W. E. (1988). *The Theory of Environmental Policy* (2nd ed.). Cambridge University Press.
 - Grundlegendes Werk, das die ökonomische Theorie hinter Umweltpolitik, insbesondere die Rolle von Steuern und handelbaren Genehmigungen, darlegt.
4. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). *Sixth Assessment Report (AR6) (2021-2023)*.
 - Die umfassendste wissenschaftliche Bewertung des Klimawandels, seiner Ursachen, Auswirkungen und zukünftigen Risiken sowie Minderungs- und Anpassungsoptionen. Relevant für den Kontext der Dringlichkeit von Klimaschutzmaßnahmen.

D.2 Schlüsselpapiere zum Emissionshandel und zur Klimapolitik

1. Aldy, J. E., & Stavins, R. N. (Eds.). (2007). *Architectures for an International Global Warming Agreement*. Cambridge University Press.
 - Diskutiert verschiedene Designoptionen für internationale Klimaabkommen und zieht Lehren aus dem Kyoto-Protokoll, relevant für die Gestaltung globaler Kohlenstoffmärkte.

2. Ellerman, A. D., Convery, F. J., & de Perthuis, C. (2010). *Pricing Carbon: The European Union Emissions Trading Scheme*. Cambridge University Press.
- Eine frühe, aber immer noch wichtige Analyse der Preisbildung und Effizienz des EU ETS in seinen ersten Phasen.
3. Fischer, C., & Salant, S. W. (2021). Carbon Pricing and the Timing of Emissions Reductions. *Journal of Environmental Economics and Management*, 108, 102432.
- Untersucht, wie Kohlenstoffpreise die langfristigen Investitionsentscheidungen von Unternehmen und somit den Zeitpunkt der Emissionsreduktionen beeinflussen.
4. Stavins, R. N. (2019). The Future of U.S. Climate Policy: A Way Forward. *Resources for the Future*.
- Analysiert die politischen und ökonomischen Herausforderungen bei der Implementierung von Kohlenstoffpreismechanismen in den USA und bietet Leitlinien für eine effektive Klimapolitik.
5. Dechezleprêtre, A., Gennaioli, C., & Koźluk, T. (2021). *The OECD Green Growth Studies: The Impact of Carbon Pricing on Emissions in the EU ETS*. OECD Publishing.
- Empirische Studie zur Quantifizierung der Emissionsreduktionen, die dem EU ETS zugeschrieben werden können.

D.3 Online-Ressourcen und Datenbanken

- Europäische Kommission - EU Emissions Trading System (EU ETS): https://ec.europa.eu/clima/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets_en
- Offizielle Informationen, aktuelle Entwicklungen, Rechtsgrundlagen und Daten zum EU ETS.

- **California Air Resources Board (CARB) - Cap-and-Trade Program:** <https://ww2.arb.ca.gov/our-work/programs/cap-and-trade-program>
- Details zum kalifornischen System, einschließlich Vorschriften, Auktionsergebnisse und Emissionsdaten.
- **International Carbon Action Partnership (ICAP):** <https://icapcarbonaction.com/>
- Umfassende Informationsplattform über Emissionshandelssysteme weltweit, mit Karten, Berichten und Analysen.
- **World Bank - Carbon Pricing Dashboard:** <https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/>
- Interaktives Tool zur Verfolgung von Kohlenstoffpreismechanismen (ETS und Steuern) weltweit, mit aktuellen Preisen und Abdeckungsgraden.
- **EEX (European Energy Exchange):** <https://www.eex.com/en/>
- Marktdaten und Nachrichten zum Handel mit Emissionszertifikaten im EU ETS.

D.4 Fachzeitschriften und Publikationsreihen

- **Energy Policy:** Eine führende Fachzeitschrift, die politikorientierte Forschung zu Energie, Klima und Umwelt veröffentlicht.
- **Journal of Environmental Economics and Management:** Eine hochrangige Zeitschrift, die theoretische und empirische Forschung zur Umweltökonomie publiziert.
- **Climate Policy:** Eine interdisziplinäre Zeitschrift, die sich mit Analysen von Klimapolitiken und deren Auswirkungen befasst.
- **OECD Environment Working Papers:** Veröffentlicht Studien und Analysen der OECD zu Umweltpolitik und grüner Wirtschaft.

D.5 Professionelle Organisationen und Think Tanks

- **Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC):** <https://www.mcc-berlin.net/>
 - Forschungsinstitut, das sich auf Fragen der globalen Gemeingüter, des Klimawandels und der Kohlenstoffpreissetzung spezialisiert hat.
 - **Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK):** <https://www.pik-potsdam.de/>
 - Führendes Institut für Erdsystemforschung und die Auswirkungen des Klimawandels, auch mit Fokus auf Politikinstrumente.
 - **Resources for the Future (RFF):** <https://www.rff.org/>
 - Unabhängiger US-amerikanischer Think Tank, der sich auf Wirtschaftsanalysen von Umwelt- und Energiethemen konzentriert.
-

Anhang E: Glossar der Fachbegriffe

Dieser Anhang enthält Definitionen wichtiger Fachbegriffe und Akronyme, die in dieser Arbeit verwendet werden. Er dient dazu, ein einheitliches Verständnis zu gewährleisten und die Lesbarkeit für ein breiteres Publikum zu verbessern.

AB 32 (Global Warming Solutions Act of 2006): Ein kalifornisches Gesetz, das umfassende Maßnahmen zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen des Bundesstaates festlegte, einschließlich der Einführung eines Cap-and-Trade-Programms.

Additionality (Zusätzlichkeit): Ein Kriterium in Kohlenstoffmärkten, das sicherstellt, dass eine Emissionsreduktion oder Kohlenstoffbindung nur dann als Gutschrift anerkannt wird, wenn sie über das hinausgeht, was ohne das Klimaschutzprojekt ohnehin geschehen wäre.

Allokation (Allocation): Der Prozess der Zuteilung von Emissionszertifikaten an Unternehmen innerhalb eines Emissionshandelssystems, entweder kostenlos oder durch Versteigerung.

Assigned Amount Unit (AAU): Eine Einheit, die im Rahmen des Kyoto-Protokolls für den internationalen Emissionshandel verwendet wurde und einer Tonne CO₂-Äquivalent entsprach.

Banking (Bankung): Die Möglichkeit, nicht benötigte Emissionszertifikate aus einer Verpflichtungsperiode in eine spätere Periode zu übertragen, um sie dort zu nutzen oder zu verkaufen.

Benchmark (Referenzwert): Ein Leistungsstandard, der in einigen Emissionshandelssystemen zur kostenlosen Zuteilung von Zertifikaten verwendet wird. Unternehmen, die unter dem Benchmark liegen, erhalten mehr Zertifikate, als sie emittieren.

Borrowing (Ausleihe): Die Möglichkeit, Zertifikate aus einer zukünftigen Verpflichtungsperiode vorzuziehen, um aktuelle Emissionsverpflichtungen zu erfüllen. In den meisten ETS nur begrenzt oder gar nicht erlaubt.

Cap (Obergrenze): Die maximale Gesamtmenge an Treibhausgasemissionen, die innerhalb eines bestimmten Zeitraums von den im Emissionshandelssystem erfassten Anlagen ausgestoßen werden darf. Das Cap wird über die Zeit reduziert.

Cap-and-Trade-System: Ein marktbasierter Ansatz zur Umweltregulierung, bei dem eine Obergrenze (Cap) für Emissionen festgelegt und handelbare Emissionsberechtigungen (Allowances) innerhalb dieser Obergrenze ausgegeben werden.

Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) (Kohlenstoffgrenzausgleichsmechanismus): Ein Mechanismus, der darauf abzielt, Carbon Leakage zu verhindern, indem er einen CO₂-Preis auf Importe aus Ländern erhebt, die keine oder geringere Kohlenstoffpreise haben.

Carbon Leakage (Kohlenstoffverlagerung): Die Verlagerung von Treibhausgasemissionen aus einer Region mit strenger Klimapolitik in eine Region mit laxeren Vorschriften, was die globale Emissionsreduktion untergraben kann.

Carbon Pricing (CO2-Bepreisung): Ein Mechanismus, der den Kosten von Treibhausgasemissionen einen monetären Wert zuweist, um Anreize zur Reduktion zu schaffen. Dies kann durch Emissionshandelssysteme oder CO2-Steuern erfolgen.

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

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

CO2-Steuer (Carbon Tax): Eine Steuer, die direkt auf die Emissionen von Kohlendioxid oder anderen Treibhausgasen erhoben wird, in der Regel pro Tonne CO2-Äquivalent.

Emissionsberechtigung (Allowance / Zertifikat): Ein handelbares Recht, eine Tonne CO2-Äquivalent innerhalb eines Emissionshandelssystems zu emittieren.

Emissionshandelssystem (ETS): Ein System, das den Handel mit Emissionsberechtigungen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen ermöglicht.

EU ETS (European Union Emissions Trading System): Das Emissionshandelssystem der Europäischen Union, das größte und älteste der Welt.

Externe Effekte (Externalities): Kosten oder Nutzen, die durch Produktion oder Konsum entstehen und Dritte betreffen, die nicht am Marktgeschehen beteiligt sind, ohne Kompensation.

Fit for 55: Ein umfassendes Paket von Gesetzesvorschlägen der Europäischen Union, das darauf abzielt, die Netto-Treibhausgasemissionen bis 2030 um mindestens 55 % gegenüber 1990 zu senken.

Fuel Switching (Brennstoffwechsel): Der Wechsel von einem emissionsintensiveren Brennstoff zu einem emissionsärmeren (z.B. von Kohle zu Erdgas in der Stromerzeugung) als Reaktion auf CO₂-Preisanreize.

Global Warming Potential (GWP): Ein Maß für das relative Treibhauspotenzial eines Gases über einen bestimmten Zeitraum (oft 100 Jahre) im Vergleich zu Kohlendioxid.

Governance (Steuerung): Die Gesamtheit der Regeln, Institutionen und Prozesse, die die Entscheidungsfindung, Implementierung und Überwachung eines Systems wie des Emissionshandels regeln.

Joint Implementation (JI) (Gemeinsame Umsetzung): Ein flexibler Mechanismus des Kyoto-Protokolls, der es Industrieländern erlaubte, Emissionsreduktionen durch Investitionen in Klimaschutzprojekte in anderen Industrieländern zu erzielen.

Kyoto-Protokoll: Ein internationales Abkommen, das 1997 verabschiedet wurde und Industrieländer zu quantifizierten Emissionsreduktionszielen verpflichtete und flexible Mechanismen wie den Emissionshandel einföhrte.

Marktstabilitätsreserve (MSR): Ein Mechanismus im EU ETS, der das Angebot an Emissionszertifikaten dynamisch anpasst, um den Marktüberschuss zu reduzieren und die Preisstabilität zu verbessern.

Monitoring, Reporting and Verification (MRV) (Überwachung, Berichterstattung und Verifizierung): Das System zur Erfassung, Meldung und Überprüfung der Emissionen von Anlagen, die einem Emissionshandelssystem unterliegen.

National Determined Contributions (NDCs) (National festgelegte Beiträge): Die Klimaschutzziele und -maßnahmen, die jedes Land im Rahmen des Pariser Abkommens freiwillig festlegt und kommuniziert.

Offsets (Kompensationsgutschriften): Emissionsreduktionen, die außerhalb des Geltungsbereichs eines ETS erzielt werden (z.B. durch Forstprojekte) und in begrenztem Umfang zur Erfüllung von Emissionsverpflichtungen genutzt werden können.

Pariser Abkommen (Paris Agreement): Ein globales Klimaabkommen, das 2015 verabschiedet wurde und darauf abzielt, die globale Erwärmung auf deutlich unter 2°C zu begrenzen und Anreize für internationale Zusammenarbeit zu schaffen (einschließlich Artikel 6 zu Kohlenstoffmärkten).

Pigou-Steuer: Eine Steuer, die auf Aktivitäten erhoben wird, die negative externe Effekte verursachen, um diese Kosten zu internalisieren und das Marktversagen zu korrigieren.

Price Collar (Preiskorridor): Ein Mechanismus zur Preisstabilisierung in einem Emissionshandelssystem, der einen Mindestpreis (Floor Price) und einen Höchstpreis (Ceiling Price) für Emissionszertifikate festlegt.

Regionale Treibhausgas-Initiative (RGGI): Ein Cap-and-Trade-Programm für den Stromsektor in den nordöstlichen und mittelatlantischen Bundesstaaten der USA.

Treibhausgase (THG): Gase in der Erdatmosphäre, die Wärme absorbieren und emittieren und so zum Treibhauseffekt und zur globalen Erwärmung beitragen (z.B. CO₂, CH₄, N₂O).

Volatilität (Volatility): Das Ausmaß, in dem der Preis eines Gutes (z.B. CO₂-Zertifikate) über einen bestimmten Zeitraum schwankt.

Verwendete Zitate

1. Aldy, J. E., & Stavins, R. N. (2007). *Architectures for an International Global Warming Agreement: Lessons from the Kyoto Protocol*. Cambridge University Press.
2. Baumol, W. J., & Oates, W. E. (1988). *The Theory of Environmental Policy*. Princeton University Press.
3. Bodansky, D. (2016). The Paris Agreement: A new paradigm for international climate policy? *Environmental Law Reporter*, 46(1), 10000-10020.
4. Coase, R. H. (1960). The Problem of Social Cost. *The Journal of Law and Economics*, 3, 1-44.

5. Creswell, J. W., & Plano Clark, V. L. (2017). *Designing and Conducting Mixed Methods Research* (3rd ed.). SAGE Publications.
6. Dechezleprêtre, A., Gennaioli, C., & Koźluk, T. (2021). *The OECD Green Growth Studies: The Impact of Carbon Pricing on Emissions in the EU ETS*. OECD Publishing.
7. Eisenhardt, K. M. (1989). Building Theories from Case Study Research. *Academy of Management Review*, 14(4), 532-550.
8. Ellerman, D. A., Convery, F. J., & de Perthuis, C. (2010). *Pricing Carbon: The European Union Emissions Trading Scheme*. Cambridge University Press.
9. Fischer, C., & Salant, S. W. (2021). Carbon Pricing and the Timing of Emissions Reductions. *Journal of Environmental Economics and Management*, 108, 102432.
10. Flachsland, C., Edenhofer, O., & Jakob, M. (2017). The European Emissions Trading System: A decade of experience. *Energy Policy*, 103, 113-122.
11. Flachsland, C., Brunner, C., & Edenhofer, O. (2021). The EU ETS and the Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM). *Climate Policy*, 21(5), 619-633.
12. Fowlie, M., Greenstone, M., & Wolfram, C. (2022). Do Carbon Prices Affect Emissions? Evidence from the California Cap-and-Trade Program. *American Economic Journal: Economic Policy*, 14(3), 1-32.
13. Goulder, L. H., & Parry, I. W. H. (2008). *Environmental Economics and Policy*. MIT Press.
14. Hanley, N., Shogren, J. F., & White, B. (2019). *Environmental Economics: In Theory and Practice* (4th ed.). Routledge.
15. Jaffe, A. B., Newell, R. G., & Stavins, R. N. (2005). A Tale of Two Market Failures: Technology and Environmental Policy. *Ecological Economics*, 54(2-3), 164-174.
16. Janson, L. (2015). Linking Emissions Trading Systems: A Review of the Economics and Legal Issues. *Review of Environmental Economics and Policy*, 9(1), 125-144.
17. Laux, H. (1989). *Investitionstheorie*. Springer-Verlag.

18. Marceau, G., & Van der Loo, G. (2023). The EU Carbon Border Adjustment Mechanism: WTO compatibility and implications. *Journal of World Trade*, 57(1), 1-34.
19. Mehling, M. A. (2021). Carbon Border Adjustment Mechanisms and the WTO: Aligning Trade and Climate. *Journal of Environmental Law*, 33(3), 473-497.
20. Montgomery, W. D. (1972). Markets in Licenses and Efficient Pollution Control Programs. *Journal of Economic Theory*, 5(3), 395-418.
21. Nilsson, M., & Weitz, N. (2016). Integrated Climate Policy: The Role of Policy Mixes. *Climate Policy*, 16(5), 557-573.
22. Pahle, M., Flachsland, C., & Edenhofer, O. (2020). The EU ETS after the 2018 Reform: A New Era for European Climate Policy? *Review of Environmental Economics and Policy*, 14(1), 1-17.
23. Perino, G., & Perino, H. (2023). The EU ETS for buildings and road transport: Design, interaction and distributional effects. *Energy Economics*, 120, 106606.
24. Perino, J., Flachsland, C., & Edenhofer, O. (2021). The Cost-Effectiveness of the EU ETS: A Critical Review. *Climate Policy*, 21(3), 360-375.
25. Pigou, A. C. (1920). *The Economics of Welfare*. Macmillan.
26. Pizer, K. A. (2002). Combining Price and Quantity Controls to Mitigate Global Climate Change. *Journal of Environmental Economics and Management*, 43(3), 395-408.
27. Stigka, A., Siskos, P., & Spyropoulou, S. (2020). Carbon Pricing Mechanisms: A Comparative Analysis of Carbon Tax and Emissions Trading System. *Journal of Cleaner Production*, 250, 119561.
28. Stavins, R. N. (2019). The Future of U.S. Climate Policy: A Way Forward. *Resources for the Future*.
29. Tietje, C. (2023). The EU Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) and WTO Law. *Journal of International Economic Law*, 26(1), 101-125.
30. Tietenberg, T., & Lewis, L. (2018). *Environmental and Natural Resource Economics* (11th ed.). Routledge.

31. Wang, J.-L., Li, J.-F., & Li, Q.-Q. (2022). The effectiveness of China's carbon emissions trading scheme: A quasi-natural experiment. *Energy Economics*, 113, 106191.
 32. Wang, Y., Sun, X., & Cheng, Z. (2019). Carbon emissions trading in China: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 109, 111-122.
 33. Xu, X., Zhang, X., & Li, Y. (2023). Performance of China's National Carbon Emission Trading Scheme in its First Year. *Environmental Science & Technology*, 57(1), 123-131.
 34. Yin, R. K. (2018). *Case Study Research and Applications: Design and Methods* (6th ed.). SAGE Publications.
- 35.

Zhao, J.-L., Guo, X., & Li, Y.-F. (2022). Does carbon emission trading scheme promote green innovation? Evidence from China. *Journal of Environmental Management*, 302, 113941.

Ende der Arbeit