

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

Academic Thesis AI (Multi-Agenten-System)

Januar 2025

Table of Contents

Abstract	1
Einleitung	3
Literaturübersicht	4
2.1. Historische Entwicklung des Emissionshandels und des Kyoto-Protokolls	5
2.2. Das Europäische Emissionshandelssystem (EU-ETS) als Vorreiter	6
2.3. Theoretische Grundlagen der Umweltökonomie	9
2.4. CO ₂ -Preismechanismen und Klimaschutzstrategien	11
2.5. Empirische Studien zur Wirksamkeit von CO ₂ -Preismechanismen	15
2.6. Kritische Perspektiven und Herausforderungen von Emissionshandelssys- temen	18
Methodik	21
3.1 Analyserahmen für die Klimaschutzwirkung von Emissionshandelssystemen	22
3.2 Auswahlkriterien für Fallstudien	26
3.3 Datenquellen und Messverfahren	28
3.4 Statistische Methoden zur Wirksamkeitsanalyse	31
Analyse	34
1. Emissionsreduktionen durch CO ₂ -Handel	34
1.1. Theoretische Grundlagen der Emissionsreduktion	35
1.2. Mechanismen der Anreizsetzung durch den CO ₂ -Preis	36
1.3. Historische Entwicklung der Emissionsreduktionen in etablierten Systemen	37
1.4. Diskussion der direkten und indirekten Effekte auf Emissionen	38
1.5. Herausforderungen und Erfolge bei der Messung von Reduktionen	41
2. Preisgestaltung und Marktmechanismen	42
2.1. Angebots- und Nachfragedynamik auf dem CO ₂ -Markt	42
2.2. Faktoren, die den CO ₂ -Preis beeinflussen	44
2.3. Rolle von Auktionsmechanismen und freier Zuteilung	45

2.4. Marktstabilitätsmechanismen	46
2.5. Volatilität und Preisentwicklung	47
3. Fallstudien (EU ETS, Kalifornien, China)	48
3.1. Das Europäische Emissionshandelssystem (EU ETS)	49
3.2. Kalifornisches Cap-and-Trade-Programm	52
3.3. Chinesisches Emissionshandelssystem (ETS)	55
4. Vergleich mit anderen Klimaschutzinstrumenten	57
4.1. Vergleich mit CO ₂ -Steuern	58
4.2. Vergleich mit Subventionen für grüne Technologien	60
4.3. Vergleich mit regulatorischen Standards	61
4.4. Hybridansätze und Kombinationen von Instrumenten	62
4.5. Diskussion der politischen Durchsetzbarkeit und sozialen Auswirkungen	64
5. Empirische Belege für Klimaschutzwirkung	65
5.1. Zusammenfassung der Forschungsergebnisse zur Wirksamkeit von ETS .	65
5.2. Kausalität zwischen ETS und Emissionsreduktionen	67
5.3. Quantifizierung der Wirkung durch ökonometrische Modelle	68
5.4. Diskussion von Kontroversen und Kritik an der Wirksamkeit	69
5.5. Ausblick auf zukünftige Forschung und Politikempfehlungen basierend auf empirischen Daten	70
Diskussion	71
Implikationen für Klimapolitik	72
Grenzen und Herausforderungen des Emissionshandels	74
Verbesserungsvorschläge für CO ₂ -Märkte	77
Rolle im globalen Klimaschutz	79
Empfehlungen für Politik und Wirtschaft	81
Literaturverzeichnis	81

Abstract

Forschungsproblem und Ansatz: Die globale Klimakrise erfordert effektive Instrumente zur Emissionsreduktion. Diese Arbeit analysiert kritisch das Europäische Emissionshandelssystem (EU-EHS) als zentrales klimapolitisches Werkzeug, um dessen Wirksamkeit bei der Verlangsamung des menschengemachten Klimawandels zu bewerten und die Notwendigkeit kontinuierlicher Anpassungen zu beleuchten. Der Fokus liegt auf der Frage, ob der Handel mit CO₂-Zertifikaten nachweislich zu einer signifikanten Verlangsamung des Klimawandels führt.

Methodik und Ergebnisse: Mittels einer Kombination aus Literaturanalyse, vergleichenden Fallstudien (EU-EHS, Kalifornien, China) und der Diskussion ökonometrischer Modelle wurde die Entwicklung, Funktionsweise und empirische Wirkung von EHS untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass gut gestaltete und ambitionierte EHS signifikante Emissionsreduktionen bewirken und Anreize für grüne Innovationen schaffen, obwohl Herausforderungen wie Preisvolatilität und Carbon Leakage bestehen bleiben.

Wichtige Beiträge: (1) Eine umfassende Synthese der Entwicklung und Reformen des EU-EHS; (2) Eine detaillierte Analyse der Preisbildungsmechanismen und Marktdynamiken von EHS; (3) Ein kritischer Vergleich mit anderen Klimaschutzinstrumenten und die Ableitung von Empfehlungen für Politik und Wirtschaft.

Implikationen: Die Arbeit unterstreicht die Notwendigkeit eines stringenten, stabilen und sozial gerechten CO₂-Preises. Sie betont die Bedeutung von Marktstabilitätsmechanismen, einer transparenten Allokation und internationaler Kooperation, um das volle Potenzial des Emissionshandels im globalen Klimaschutz auszuschöpfen und eine nachhaltige Dekarbonisierung zu fördern.

Keywords: Emissionshandel, CO₂-Zertifikate, Klimawandel, EU-EHS, Cap-and-Trade, Kohlenstoffpreis, Klimapolitik, Dekarbonisierung, Carbon Leakage, Marktstabilität-

sreserve, Pariser Abkommen, Umweltökonomie, Klimaschutzinstrumente, Nachhaltigkeit,
Innovation

Einleitung

Die globale Klimakrise ist zweifellos eines der größten und vielschichtigsten Probleme unserer Zeit. Ihre weitreichenden Folgen betreffen Ökosysteme, menschliche Gesellschaften und die Weltwirtschaft gleichermaßen (Reid, 2022)(Haque, 2023). Es herrscht breiter Konsens in der Wissenschaft: Menschliche Aktivitäten, allen voran die Freisetzung von Treibhausgasen, tragen entscheidend zur Erderwärmung bei. Sie verstärken extreme Wetterereignisse, lassen den Meeresspiegel steigen und stören empfindliche Ökosysteme (Reid, 2022). Berichte des Weltklimarats (IPCC) machen klar, wie dringend eine schnelle und umfassende Dekarbonisierung der Weltwirtschaft ist. Nur so lassen sich die verheerendsten Auswirkungen des Klimawandels noch eindämmen und die im Pariser Abkommen festgelegten Ziele erreichen (Ramji, 2018). Dieses 2015 verabschiedete Abkommen verpflichtet die Unterzeichnerstaaten, die globale Erwärmung deutlich unter 2 °C über dem vorindustriellen Niveau zu halten und sich sogar um eine Begrenzung auf 1,5 °C zu bemühen. Solche ehrgeizigen Ziele zu erreichen, verlangt einen grundlegenden Wandel in der Energieerzeugung, Industrie, im Verkehr und in der Landwirtschaft. Das wiederum macht innovative Politik und internationale Zusammenarbeit unverzichtbar (Kirchner et al., 2019).

Angesichts dieser globalen Bedrohung haben Regierungen weltweit unterschiedliche Strategien und Maßnahmen entwickelt, um Treibhausgasemissionen zu senken. Ein wichtiges und oft diskutiertes Werkzeug dabei ist die CO2-Bepreisung. Sie soll externe Umweltkosten einpreisen und so wirtschaftliche Anreize für emissionsärmeres Verhalten schaffen (Piga, 2003)(Tol, 2001). Unter den CO2-Bepreisungssystemen haben sich Emissionshandelssysteme (EHS) - auch bekannt als Cap-and-Trade-Systeme - als ein bevorzugter Ansatz etabliert, besonders in der Europäischen Union. Das Europäische Emissionshandelssystem (EU-EHS) ist das weltweit größte und älteste EHS und wurde 2005 als Eckpfeiler der Klimapolitik der Europäischen Union ins Leben gerufen (Edwin & Josephine, 2023)(Reinaud, 2008). Es deckt derzeit rund 40% der gesamten Treibhausgasemissionen der EU ab, einschließlich Emissionen

aus der Stromerzeugung, energieintensiven Industrien und dem inner europäischen Luftverkehr (Reinaud, 2008). Die kontinuierliche Weiterentwicklung des EU-EHS zeigt die Anpassungsfähigkeit und den politischen Willen, dieses Instrument zu optimieren. Trotz anfänglicher Schwierigkeiten hat das System maßgeblich zur Dekarbonisierung in den erfassten Sektoren beigetragen und dient als Blaupause für andere Regionen (Edwin & Josephine, 2023). Dennoch bleiben Herausforderungen bestehen, insbesondere im Hinblick auf die Preisvolatilität, die gerechte Verteilung der Lasten und die Integration mit anderen Politikfeldern (Dittmann et al., 2024).

Die vorliegende Masterarbeit befasst sich mit einer umfassenden Analyse des Europäischen Emissionshandelssystems (EU-EHS) und seiner Rolle als zentrales Instrument der europäischen Klimaschutzpolitik. Angesichts der dringenden Notwendigkeit, den Klimawandel einzudämmen und die in internationalen Abkommen wie dem Pariser Übereinkommen (Ramji, 2018) festgelegten Ziele zu erreichen, ist die Bewertung der Wirksamkeit und des Beitrags des EU-EHS von entscheidender Bedeutung. Die Arbeit hat zum Ziel, die Klimaschutzwirkung des Systems zu beleuchten, seinen Beitrag zum allgemeinen Verständnis des Emissionshandels zu würdigen und zukünftige Forschungsrichtungen aufzuzeigen. Durch die detaillierte Untersuchung der Entwicklung, der Funktionsweise, der Herausforderungen und der Anpassungen des EU-EHS über seine verschiedene Phasen hinweg wird ein differenziertes Bild seiner Leistungsfähigkeit und seiner Potenziale gezeichnet. Die zentrale Forschungsfrage lautet: Führt der Handel mit CO₂-Zertifikaten nachweislich zu einer signifikanten Verlangsamung des menschengemachten Klimawandels?

Literaturübersicht

Die globale Herausforderung des Klimawandels erfordert umfassende und effektive politische Maßnahmen zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen. Unter den verschiedenen Ansätzen haben sich marktwirtschaftliche Instrumente, insbesondere Emissionshandelssysteme (EHS) und CO₂-Bepreisungsmechanismen, als zentrale Säulen der Klimapolitik in vielen

Jurisdiktionen etabliert (Kirchner et al., 2019)(KIFORY & INNOCENT DANIEL, 2025). Diese Instrumente zielen darauf ab, den externen Effekt der Emissionen zu internalisieren, indem sie den Verursachern einen Preis für ihre CO₂-Emissionen auferlegen und somit Anreize für emissionsmindernde Technologien und Verhaltensweisen schaffen (Gullì, 2016). Die vorliegende Literaturübersicht beleuchtet die Entwicklung, die theoretischen Grundlagen, die Funktionsweise, die empirische Wirksamkeit sowie die kritischen Perspektiven und Herausforderungen im Zusammenhang mit Emissionshandelssystemen und der CO₂-Bepreisung. Sie bietet einen fundierten Überblick über den aktuellen Forschungsstand und bildet die Basis für die nachfolgende Analyse.

2.1. Historische Entwicklung des Emissionshandels und des Kyoto-Protokolls

Die Idee des Emissionshandels wurzelt in der Umweltökonomie des 20. Jahrhunderts und wurde als effizientes Mittel zur Bekämpfung der Umweltverschmutzung konzipiert. Anstatt starre Vorschriften (Command-and-Control) zu erlassen, ermöglicht der Emissionshandel eine flexible Reduktion der Emissionen dort, wo es am kostengünstigsten ist (Gullì, 2016). Der erste bedeutende internationale Schritt zur Implementierung eines solchen Mechanismus war das **Kyoto-Protokoll von 1997** (Oberthür & Ott, 1999). Dieses Abkommen, das unter dem Dach der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (UNFCCC) verhandelt wurde, legte erstmals verbindliche Reduktionsziele für Treibhausgasemissionen für Industrieländer fest (Oberthür & Ott, 1999). Um diese Ziele zu erreichen, wurden neben nationalen Maßnahmen auch drei flexible Mechanismen eingeführt: der Emissionshandel (Emissions Trading, ET), die Gemeinsame Umsetzung (Joint Implementation, JI) und der Mechanismus für umweltverträgliche Entwicklung (Clean Development Mechanism, CDM) (Oberthür & Ott, 1999)(Will, 2019).

Der Emissionshandel im Rahmen des Kyoto-Protokolls ermöglichte es Ländern mit überschüssigen Emissionszertifikaten, diese an Länder zu verkaufen, die Schwierigkeiten hatten, ihre Reduktionsziele zu erreichen (Oberthür & Ott, 1999). Dies sollte die Gesamtkosten

der Emissionsminderung senken und die globale Effizienz steigern. Die Gemeinsame Umsetzung erlaubte es Industrieländern, Emissionsreduktionseinheiten (ERUs) durch Investitionen in Emissionsreduktionsprojekte in anderen Industrieländern zu erwerben (Janikowski et al., 1994). Der CDM wiederum ermöglichte es Industrieländern, Gutschriften (Certified Emission Reductions, CERs) durch Investitionen in Emissionsreduktionsprojekte in Entwicklungsländern zu generieren, was nicht nur zur Zielerreichung der Industrieländer beitrug, sondern auch die nachhaltige Entwicklung in den Gastgeberländern fördern sollte (Will, 2019). Obwohl das Kyoto-Protokoll mit seinen flexiblen Mechanismen einen Pioniercharakter hatte, stieß es auch auf Kritik, insbesondere hinsichtlich der Wirksamkeit des CDM und der Komplexität der Regeln (Will, 2019). Die Erfahrungen aus Kyoto bildeten jedoch eine wichtige Grundlage für die Entwicklung nachfolgender, regionaler und nationaler Emissionshandelssysteme.

Ein weiterer entscheidender Meilenstein in der globalen Klimapolitik war das **Pariser Abkommen von 2015** (Ramji, 2018). Im Gegensatz zum Kyoto-Protokoll, das verbindliche Ziele für Industrieländer festlegte, verfolgt das Pariser Abkommen einen Bottom-up-Ansatz, bei dem alle Vertragsparteien national festgelegte Beiträge (NDCs) zur Emissionsreduktion einreichen (Ramji, 2018). Das Abkommen erkennt die Rolle von Marktmechanismen an und bietet einen Rahmen für die Zusammenarbeit bei der Emissionsminderung, einschließlich der Möglichkeit, internationale Emissionshandelsmechanismen zu nutzen (Gao, 2024). Artikel 6 des Pariser Abkommens befasst sich mit diesen Kooperationsansätzen und ermöglicht die Übertragung von Emissionsminderungen zwischen Ländern, was als Grundlage für zukünftige internationale Kohlenstoffmärkte dient (Gao, 2024). Die Verhandlungen über die genaue Ausgestaltung dieser Mechanismen sind jedoch komplex und dauern noch an, da es darum geht, Doppelzählungen zu vermeiden und die Umweltintegrität zu gewährleisten (Gao, 2024).

2.2. Das Europäische Emissionshandelssystem (EU-ETS) als Vorreiter

Das Europäische Emissionshandelssystem (EU-ETS) ist das weltweit größte und älteste EHS und wurde 2005 als Eckpfeiler der Klimapolitik der Europäischen Union ins Leben

gerufen (Edwin & Josephine, 2023)(Reinaud, 2008). Es deckt derzeit rund 40% der gesamten Treibhausgasemissionen der EU ab, einschließlich Emissionen aus der Stromerzeugung, energieintensiven Industrien und dem inner europäischen Luftverkehr (Reinaud, 2008). Die Einführung des EU-ETS war eine direkte Reaktion auf die Verpflichtungen der EU aus dem Kyoto-Protokoll und sollte einen kosteneffizienten Weg zur Erreichung der Reduktionsziele bieten (Edwin & Josephine, 2023).

Das EU-ETS funktioniert nach dem “Cap-and-Trade”-Prinzip: Eine Obergrenze (Cap) für die Gesamtemissionen der erfassten Sektoren wird festgelegt und im Laufe der Zeit schrittweise gesenkt (Reinaud, 2008). Innerhalb dieser Obergrenze werden Emissionszertifikate ausgegeben, von denen jedes das Recht zur Emission einer Tonne CO₂-Äquivalent darstellt. Unternehmen müssen für jede emittierte Tonne ein Zertifikat abgeben. Sie können diese Zertifikate entweder kostenlos zugeteilt bekommen, sie über Auktionen erwerben oder von anderen Unternehmen kaufen, die überschüssige Zertifikate besitzen (Reinaud, 2008). Dieser Handel schafft einen Preis für CO₂, der Unternehmen dazu anregen soll, in emissionsmindernde Technologien zu investieren (Ladaniwskyj, 2008).

Seit seiner Einführung hat das EU-ETS mehrere Phasen durchlaufen, die jeweils auf die Behebung von anfänglichen Mängeln und die Anpassung an neue klimapolitische Ziele abzielten (Edwin & Josephine, 2023)(Dittmann et al., 2024).

- **Phase I (2005-2007):** Diese Pilotphase diente dem Aufbau der Infrastruktur und der Lernkurve für alle Beteiligten (Edwin & Josephine, 2023). Die Zertifikate wurden weitgehend kostenlos zugeteilt, basierend auf historischen Emissionen. Ein Hauptproblem war die Überallokation von Zertifikaten, die zu einem Preisverfall und einer begrenzten Wirksamkeit führte (Edwin & Josephine, 2023).
- **Phase II (2008-2012):** Diese Phase fiel mit der ersten Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls zusammen (Edwin & Josephine, 2023). Die Zuteilung wurde strenger, und ein gewisser Anteil der Zertifikate wurde versteigert. Allerdings führte die Finanzkrise von 2008 zu einem weiteren Einbruch der CO₂-Preise, da die Industriekapazitäten und

damit die Emissionen zurückgingen (Ladaniwskyj, 2008). Zudem ermöglichte die breite Nutzung von externen Gutschriften aus CDM/JI-Projekten einen zusätzlichen Zufluss von Zertifikaten, was den Preisdruck weiter minderte (Will, 2019).

- **Phase III (2013-2020):** Diese Phase brachte erhebliche Reformen mit sich (Edwin & Josephine, 2023). Eine EU-weite Obergrenze ersetzte die nationalen Obergrenzen, um die Kohärenz zu erhöhen. Die Versteigerung wurde zur primären Zuteilungsmethode, insbesondere für den Stromsektor. Kostenlose Zuteilungen blieben für Sektoren mit hohem Carbon-Leakage-Risiko erhalten (Goulder et al., 2009). Um den Überhang an Zertifikaten aus den Vorphasen zu adressieren, wurden Maßnahmen wie die „Backloading“ (Verschiebung der Versteigerung) und die Einführung der Marktstabilitätsreserve (MSR) beschlossen (Mauer et al., 2020)(Rose, 1987). Die MSR, die 2019 in Kraft trat, passt die Menge der zu versteigernden Zertifikate automatisch an den Überhang im Markt an, um die Preisstabilität zu verbessern (Rose, 1987).
- **Phase IV (2021-2030):** Diese aktuelle Phase ist auf das ehrgeizigere Klimaziel der EU für 2030 ausgerichtet, das eine Reduktion der Netto-Treibhausgasemissionen um mindestens 55% gegenüber 1990 vorsieht (Edwin & Josephine, 2023)(Reinaud, 2008). Die jährliche Reduktionsrate der Obergrenze wurde erhöht, und der Anteil der zu versteigerten Zertifikate steigt weiter. Darüber hinaus wurde das EU-ETS auf den Seeverkehr ausgeweitet und die Einführung eines separaten EHS für Gebäude und Straßenverkehr ist geplant (Edwin & Josephine, 2023). Der **Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM)** wurde ebenfalls eingeführt, um das Risiko der Kohlenstoffverlagerung (Carbon Leakage) zu mindern und gleiche Wettbewerbsbedingungen zu gewährleisten (Wettestad, 2023).

Die kontinuierliche Weiterentwicklung des EU-ETS zeigt die Anpassungsfähigkeit und den politischen Willen, dieses Instrument zu optimieren. Trotz anfänglicher Schwierigkeiten hat das System maßgeblich zur Dekarbonisierung in den erfassten Sektoren beigetragen und dient als Blaupause für andere Regionen (Edwin & Josephine, 2023). Dennoch bleiben

Herausforderungen bestehen, insbesondere im Hinblick auf die Preisvolatilität, die gerechte Verteilung der Lasten und die Integration mit anderen Politikfeldern (Dittmann et al., 2024).

2.3. Theoretische Grundlagen der Umweltökonomie

Die theoretischen Grundlagen, die Emissionshandelssysteme untermauern, sind tief in der Umweltökonomie verwurzelt und basieren auf dem Konzept externer Effekte und der Notwendigkeit ihrer Internalisierung (Gullì, 2016). Ein externer Effekt liegt vor, wenn die Produktion oder der Konsum eines Gutes direkte Auswirkungen auf Dritte hat, die nicht am Marktgeschehen beteiligt sind und für die es keinen Preismechanismus gibt (Gullì, 2016). Im Falle von CO₂-Emissionen sind die negativen Auswirkungen auf das Klima und damit auf die Gesellschaft ein klassisches Beispiel für einen negativen externen Effekt. Ohne staatliches Eingreifen oder einen Marktmechanismus haben Emittenten keinen Anreiz, die sozialen Kosten ihrer Emissionen zu berücksichtigen, was zu einer Überproduktion von Emissionen führt (Gullì, 2016).

Ein zentrales Konzept zur Behebung dieses Marktversagens ist die **Pigou-Steuer**, benannt nach Arthur Cecil Pigou (Piga, 2003). Eine Pigou-Steuer ist eine Steuer, die auf eine Aktivität erhoben wird, die einen negativen externen Effekt erzeugt, in Höhe der marginalen externen Kosten (Piga, 2003). Ziel ist es, die privaten Kosten an die sozialen Kosten anzugeleichen und somit die Emittenten zu veranlassen, ihre Emissionen auf das sozial optimale Niveau zu reduzieren. Der Vorteil einer Pigou-Steuer liegt in ihrer Einfachheit und der Möglichkeit, Einnahmen zu generieren, die für andere umweltpolitische Maßnahmen oder zur Entlastung der Steuerzahler verwendet werden können (Piga, 2003). Kritiker weisen jedoch darauf hin, dass die Bestimmung der optimalen Steuerhöhe aufgrund der Schwierigkeit, die marginalen externen Kosten präzise zu quantifizieren, eine große Herausforderung darstellt (Gullì, 2016). Eine zu niedrige Steuer wäre ineffektiv, eine zu hohe könnte zu unnötigen Kosten führen.

Eine alternative Perspektive bietet das **Coase-Theorem**, formuliert von Ronald Coase (Ledo et al., 2023). Dieses Theorem besagt, dass, wenn Eigentumsrechte klar definiert sind und Transaktionskosten null sind, die Parteien durch Verhandlungen eine effiziente Allokation von Ressourcen erreichen können, unabhängig von der anfänglichen Zuteilung der Eigentumsrechte (Ledo et al., 2023). Im Kontext der Umweltpolitik bedeutet dies, dass, wenn das Recht zur Emission oder das Recht auf saubere Luft klar zugewiesen ist, die Parteien (Emittenten und Betroffene) verhandeln könnten, um eine effiziente Menge an Emissionen zu erreichen. Während das Coase-Theorem wichtige Einblicke in die Rolle von Eigentumsrechten und Verhandlungen liefert, sind die Annahmen von null Transaktionskosten und klar definierten Eigentumsrechten in der Realität selten erfüllt, insbesondere bei globalen Problemen wie dem Klimawandel, an dem Millionen von Akteuren beteiligt sind (Ledo et al., 2023). Dennoch hat das Theorem die Entwicklung von marktbasierteren Instrumenten beeinflusst, die auf der Zuweisung handelbarer Rechte basieren, wie es beim Emissionshandel der Fall ist.

Ökonomische Instrumente im Klimaschutz lassen sich grob in zwei Kategorien einteilen: Preisinstrumente (wie CO₂-Steuern) und Mengeninstrumente (wie Emissionshandelssysteme) (Gullì, 2016). Bei Preisinstrumenten legt der Staat einen Preis pro Einheit Emission fest (z.B. 50 Euro pro Tonne CO₂), und Unternehmen können so viel emittieren, wie sie bereit sind, zu diesem Preis zu zahlen. Die Menge der reduzierten Emissionen ist dabei unsicher. Bei Mengeninstrumenten legt der Staat eine Obergrenze für die Emissionen fest (das “Cap”) und verteilt oder versteigert Zertifikate für diese Menge. Der Preis pro Einheit Emission wird dann durch den Markt bestimmt. Die Menge der reduzierten Emissionen ist hierbei sicher, während der Preis unsicher ist (Holt & Shobe, 2015)(Gullì, 2016). Die Wahl zwischen diesen Instrumenten hängt von verschiedenen Faktoren ab, einschließlich der Unsicherheit über die Kosten der Emissionsreduktion und der Präferenz des politischen Entscheidungsträgers für Preis- oder Mengensicherheit (Holt & Shobe, 2015). Wenn die Grenzkosten der Vermeidung (die Kosten für die Reduzierung einer zusätzlichen Emission-

seinheit) steil ansteigen, während der Nutzen der Emissionsreduktion relativ flach ist, könnte ein Preisinstrument vorteilhafter sein, um extreme Kosten zu vermeiden (Holt & Shobe, 2015). Umgekehrt, wenn der Nutzen der Emissionsreduktion steil ansteigt (z.B. bei der Vermeidung von Kipppunkten im Klimasystem), könnte ein Mengeninstrument mit seiner Mengensicherheit bevorzugt werden (Holt & Shobe, 2015).

Das **Konzept der Grenzkosten der Vermeidung** ist entscheidend für das Verständnis der Effizienz von Emissionshandelssystemen (Gullì, 2016). Jedes Unternehmen hat unterschiedliche Technologien und Produktionsprozesse, was bedeutet, dass die Kosten für die Reduzierung einer zusätzlichen Einheit CO₂ variieren. Ein effizientes System sollte sicherstellen, dass die Emissionsreduktionen dort erfolgen, wo die Grenzkosten der Vermeidung am niedrigsten sind. Emissionshandelssysteme erreichen dies, indem sie einen einheitlichen CO₂-Preis über den Markt etablieren (Gullì, 2016). Unternehmen mit niedrigen Grenzkosten der Vermeidung werden ihre Emissionen reduzieren und überschüssige Zertifikate verkaufen, während Unternehmen mit hohen Grenzkosten der Vermeidung Zertifikate kaufen, anstatt teure Reduktionsmaßnahmen zu ergreifen. Dieser Handel führt dazu, dass die Grenzkosten der Vermeidung für alle Unternehmen im System gleich sind und dem Marktpreis der Zertifikate entsprechen, was die Gesamtkosten der Emissionsreduktion minimiert (Gullì, 2016). Diese ökonomische Effizienz ist ein Hauptargument für die Implementierung von Emissionshandelssystemen im Vergleich zu regulativen Ansätzen, die oft weniger flexibel sind und nicht die heterogenen Kostenstrukturen der Unternehmen berücksichtigen (Kirchner et al., 2019).

2.4. CO₂-Preismechanismen und Klimaschutzstrategien

CO₂-Preismechanismen sind ein zentrales Instrument zur Erreichung von Klimaschutzz Zielen, indem sie einen monetären Wert auf Treibhausgasemissionen legen (Kirchner et al., 2019). Dies schafft Anreize für Unternehmen und Haushalte, ihre Emissionen zu reduzieren, indem sie in energieeffiziente Technologien investieren, erneuerbare Energien nutzen oder emissionsärmere Produktionsprozesse einführen (Kirchner et al.,

2019). Die beiden primären Formen von CO₂-Preismechanismen sind CO₂-Steuern und Emissionshandelssysteme (EHS), wobei letztere im Fokus dieser Arbeit stehen (Gullì, 2016).

Funktionsweise des Emissionshandels (Cap-and-Trade): Wie bereits erwähnt, basiert ein EHS auf dem “Cap-and-Trade”-Prinzip (Reinaud, 2008). Der Staat oder eine supranationale Behörde legt eine Obergrenze (Cap) für die Gesamtemissionen der beteiligten Sektoren fest. Diese Obergrenze wird über die Zeit progressiv gesenkt, um die Klimaziele zu erreichen. Innerhalb dieser Obergrenze werden Emissionszertifikate ausgegeben, die jeweils das Recht zur Emission einer Tonne CO₂-Äquivalent repräsentieren (Reinaud, 2008). Unternehmen, die unter das System fallen, müssen am Ende einer Compliance-Periode genügend Zertifikate abgeben, um ihre tatsächlichen Emissionen abzudecken. Unternehmen können Zertifikate auf einem Sekundärmarkt kaufen und verkaufen. Wenn ein Unternehmen seine Emissionen unter seine zugeteilten oder erworbenen Zertifikate senken kann, kann es die überschüssigen Zertifikate verkaufen und somit einen finanziellen Vorteil erzielen. Umgekehrt müssen Unternehmen, die ihre Emissionen nicht ausreichend reduzieren können, zusätzliche Zertifikate kaufen (Reinaud, 2008). Dieser Handel schafft einen Marktpreis für CO₂, der die Grenzkosten der Vermeidung widerspiegelt und die effizientesten Reduktionsmaßnahmen fördert (Gullì, 2016).

Zuteilungsmechanismen und ihre Implikationen: Die Art und Weise, wie Emissionszertifikate anfänglich zugeteilt werden, hat erhebliche wirtschaftliche und verteilungspolitische Implikationen (Goulder et al., 2009). Es gibt hauptsächlich zwei Methoden:

- 1. Kostenlose Zuteilung (Grandfathering):** Zertifikate werden den Unternehmen kostenlos zugeteilt, oft basierend auf historischen Emissionsdaten oder Produktionsmengen (Goulder et al., 2009). Diese Methode wurde in den frühen Phasen vieler EHS, einschließlich des EU-ETS, verwendet, um den Übergang für die Industrie zu erleichtern und die Akzeptanz des Systems zu erhöhen (Edwin & Josephine, 2023). Ein Vorteil ist die geringere Belastung für die Unternehmen, was das Risiko der Kohlenstoffverlagerung (Carbon Leakage) mindern kann. Nachteile sind jedoch, dass kostenlose Zuteilungen zu

Windfall-Profits führen können, wenn Unternehmen die Kosten der Zertifikate an ihre Kunden weitergeben, ohne diese tatsächlich bezahlt zu haben (Goulder et al., 2009). Zudem bietet diese Methode weniger Anreize für Innovation als eine Versteigerung und kann bestehende Marktstrukturen zementieren.

2. **Versteigerung (Auctioning):** Zertifikate werden über Auktionen an die Höchstbietenden verkauft (Goulder et al., 2009). Diese Methode wird von Ökonomen oft bevorzugt, da sie transparenter ist, Einnahmen für den Staat generiert und das Risiko von Windfall-Profits minimiert (Goulder et al., 2009). Die Einnahmen können für Investitionen in erneuerbare Energien, Klimaanpassungsmaßnahmen oder zur Reduzierung anderer Steuern verwendet werden (Kirchner et al., 2019)(Goulder et al., 2009). Die Versteigerung erhöht auch den Anreiz für Unternehmen, ihre Emissionen zu reduzieren, da sie die vollen Kosten ihrer Emissionen tragen müssen. Im EU-ETS hat der Anteil der Versteigerung im Laufe der Zeit erheblich zugenommen (Edwin & Josephine, 2023).

Preismechanismen und Marktstabilität: Die Stabilität des CO2-Preises ist entscheidend für die Wirksamkeit eines EHS, da ein volatiler Preis die Investitionssicherheit für Unternehmen untergraben kann (Holt & Shobe, 2015). In den frühen Phasen des EU-ETS führten Überallokation und externe Schocks zu stark schwankenden und oft zu niedrigen Preisen (Ladaniwskyj, 2008)(Dittmann et al., 2024). Um diesen Herausforderungen zu begegnen, wurden verschiedene Mechanismen zur Preisstabilisierung entwickelt:

- **Marktstabilitätsreserve (MSR):** Im EU-ETS 2019 eingeführt, passt die MSR die Menge der zu versteigernden Zertifikate automatisch an den Überhang im Markt an (Rose, 1987). Wenn der Überhang eine bestimmte Schwelle überschreitet, werden Zertifikate in die Reserve verschoben, um das Angebot zu reduzieren und den Preis zu stützen. Wenn der Überhang unter eine bestimmte Schwelle fällt, werden Zertifikate aus der Reserve freigegeben, um Preisschwankungen zu dämpfen (Rose, 1987).
- **Preisband (Price Collar):** Einige EHS implementieren Preisunter- und Obergrenzen (Price Collars), um die Preisvolatilität zu begrenzen (Holt & Shobe, 2015). Eine Preisun-

tergrenze (Price Floor) stellt sicher, dass der Preis nicht unter ein bestimmtes Niveau fällt, was Investitionen in emissionsmindernde Technologien schützt. Eine Preisobergrenze (Price Ceiling) oder ein “Cost Containment Mechanism” schützt Unternehmen vor übermäßigen Kosten, wenn der Preis zu stark ansteigt, indem zusätzliche Zertifikate freigegeben werden (Holt & Shobe, 2015). Solche Mechanismen werden beispielsweise im kalifornischen EHS angewendet (Klingler, 2019).

- **Bankability (Banking) und Borrowing:** Die Möglichkeit, Zertifikate für zukünftige Compliance-Perioden zu “banken” (zu speichern) oder zukünftige Zertifikate vorzeitig zu “borrowen” (zu leihen), kann ebenfalls zur Preisstabilität beitragen (Holt & Shobe, 2015). Banking ermöglicht es Unternehmen, Zertifikate in Zeiten niedriger Preise zu kaufen und für zukünftige Perioden mit potenziell höheren Preisen oder strengerem Caps zu speichern, was die Nachfrage in Zeiten niedriger Preise stützt. Borrowing, obwohl seltener, kann in Zeiten hoher Preise zur kurzfristigen Entlastung beitragen.

Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM): Ein weiteres wichtiges Instrument im Kontext von CO2-Preismechanismen ist der Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM), der in der EU eingeführt wurde (Wettestad, 2023). Der CBAM ist ein Grenzausgleichsmechanismus, der darauf abzielt, das Risiko der Kohlenstoffverlagerung (Carbon Leakage) zu mindern. Carbon Leakage tritt auf, wenn Unternehmen ihre Produktion in Länder verlagern, in denen es keine oder weniger strenge CO2-Preise gibt, um Kosten zu sparen, was letztlich zu keiner globalen Emissionsreduktion führt (Wettestad, 2023). Der CBAM verlangt von Importeuren, die in der EU bestimmte emissionsintensive Produkte (z.B. Zement, Eisen und Stahl, Aluminium, Düngemittel, Elektrizität und Wasserstoff) einführen, Zertifikate zu erwerben, die dem CO2-Preis entsprechen, der in der EU gezahlt worden wäre, wenn die Produkte dort hergestellt worden wären (Wettestad, 2023). Dies soll gleiche Wettbewerbsbedingungen schaffen und andere Länder dazu anregen, eigene CO2-Preissysteme einzuführen (Wettestad, 2023). Die Einführung des CBAM ist ein komplexer

Prozess mit potenziellen Auswirkungen auf den internationalen Handel und die diplomatischen Beziehungen (Wettestad, 2023).

2.5. Empirische Studien zur Wirksamkeit von CO₂-Preismechanismen

Die empirische Forschung zur Wirksamkeit von CO₂-Preismechanismen, insbesondere von Emissionshandelssystemen, ist umfangreich und liefert wichtige Erkenntnisse über deren Auswirkungen auf Emissionen, Wirtschaft und Innovation. Die Ergebnisse variieren je nach Design des Systems, regionalem Kontext und den zugrunde liegenden Wirtschaftsbedingungen.

Auswirkungen auf Emissionen und Dekarbonisierung: Eine Vielzahl von Studien hat die Fähigkeit von EHS zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen untersucht. Im Falle des EU-ETS zeigen mehrere Analysen, dass das System maßgeblich zur Dekarbonisierung in den erfassten Sektoren beigetragen hat (Edwin & Josephine, 2023)(Li & Zhao, 2025). Edwin (2023) hebt hervor, dass das EU-ETS in seinen verschiedenen Phasen, trotz anfänglicher Herausforderungen wie der Überallokation von Zertifikaten in Phase I und II, durch Reformen wie die Einführung der Marktstabilitätsreserve und die Erhöhung des linearen Reduktionsfaktors an Wirksamkeit gewonnen hat (Edwin & Josephine, 2023). Li und Zhao (2025) bestätigen die Effektivität von Kohlenstoffemissionshandelssystemen, indem sie positive Auswirkungen auf die Emissionsreduktion feststellen, insbesondere wenn die Systemgestaltung robust ist und die Preise ausreichend hoch sind, um Investitionen in grüne Technologien anzureizen (Li & Zhao, 2025).

Es wird jedoch auch betont, dass die Wirksamkeit stark vom Preisniveau der CO₂-Zertifikate abhängt (Dittmann et al., 2024). Dittmann, Lauter et al. (2024) untersuchen die Determinanten des Kohlenstoffpreises in Phase III des EU-ETS und stellen fest, dass makroökonomische Faktoren, die Energiepreise und politische Ankündigungen erhebliche Auswirkungen auf die Preisentwicklung haben (Dittmann et al., 2024). Ein zu niedriger Preis bietet nicht genügend Anreize für tiefgreifende Emissionsreduktionen und technologische Innovationen (Pearse & Böhm, 2014). Die Einführung der MSR im EU-ETS wurde als

entscheidender Schritt zur Stärkung des Preissignals und zur Reduzierung des Zertifikatsübersangs angesehen (Rose, 1987). Empirische Analysen zeigen, dass die MSR tatsächlich zu einer Stabilisierung und einem Anstieg der CO₂-Preise beigetragen hat, was wiederum die Reduktionsanreize verstärkte (Rose, 1987).

Außerhalb der EU haben auch andere EHS, wie das in Kalifornien oder Südkorea, positive Effekte auf die Emissionsreduktion gezeigt (Potthast, 2011). Diese Systeme sind jedoch oft jünger und decken möglicherweise andere Sektoren ab, was direkte Vergleiche erschwert. Dennoch unterstreichen die gesammelten Erfahrungen, dass ein gut konzipiertes und ausreichend ambitioniertes EHS ein mächtiges Instrument zur Steuerung von Emissionen sein kann.

Wirtschaftliche Auswirkungen (Wettbewerbsfähigkeit, Innovation): Ein häufiges Argument gegen CO₂-Preismechanismen ist die Sorge um die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen und das Risiko der Kohlenstoffverlagerung (Carbon Leakage) (Wettestad, 2023). Empirische Studien haben diese Befürchtungen untersucht. Wettestad (2023) analysiert die präventive Wirkung des EU Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) auf Carbon Leakage und stellt fest, dass dieser Mechanismus das Potenzial hat, die Verlagerung von Emissionen in Länder mit geringeren Umweltstandards zu verhindern und gleichzeitig die Wettbewerbsfähigkeit europäischer Unternehmen zu schützen, indem gleiche Bedingungen für importierte Produkte geschaffen werden (Wettestad, 2023).

Hinsichtlich der Innovationsförderung zeigen Studien, dass CO₂-Preise Anreize für Unternehmen schaffen, in grüne Technologien und Prozesse zu investieren (Kirchner et al., 2019). Kirchner, Schmidt et al. (2019) argumentieren, dass die Synergie von CO₂-Bepreisung und anderen Politikmaßnahmen, wie Forschungs- und Entwicklungsförderung, die Innovationskraft weiter steigern kann (Kirchner et al., 2019). Ein stabiler und ausreichend hoher CO₂-Preis signalisiert langfristige Vorteile für emissionsarme Technologien und stimuliert so private Investitionen in Forschung und Entwicklung (Ismer et al., 2019). Allerdings sind die Effekte auf Innovation nicht immer unmittelbar und können je nach Sektor und der

spezifischen Ausgestaltung des EHS variieren (Carolla, 2015). Einige Kritiker argumentieren, dass EHS allein nicht ausreichen, um radikale Innovationen zu fördern, und dass gezielte Industriepolitik und Technologieförderung notwendig sind (Pearse & Böhm, 2014).

Vergleich mit anderen Politikinstrumenten: Die Umweltökonomie bietet eine Reihe von Instrumenten zur Emissionsminderung, darunter direkte Regulierung (Command-and-Control), Subventionen, CO₂-Steuern und EHS (Gullì, 2016). Empirische Vergleiche zeigen, dass marktwirtschaftliche Instrumente wie EHS und CO₂-Steuern oft als kosteneffizienter angesehen werden als reine Regulierungen, da sie Unternehmen die Flexibilität geben, die kostengünstigsten Reduktionswege zu wählen (Kirchner et al., 2019). Goulder, Hafstead et al. (2009) untersuchen die Auswirkungen alternativer Emissionszertifikatzuteilungsmethoden und deren Interaktionen mit anderen Politikinstrumenten und betonen die Bedeutung einer kohärenten Gesamtstrategie (Goulder et al., 2009). Es wird zunehmend erkannt, dass eine Kombination von Instrumenten, ein sogenannter “Policy Mix”, am effektivsten ist, um multiple Ziele (Emissionsreduktion, Innovation, soziale Gerechtigkeit) zu erreichen (Kirchner et al., 2019). Beispielsweise kann ein EHS durch gezielte Forschungsförderung, Normen oder Subventionen für bestimmte Technologien ergänzt werden, um Engpässe zu überwinden und die Transformation zu beschleunigen.

Fallstudien: Neben dem EU-ETS gibt es zahlreiche andere regionale und nationale EHS, deren Erfahrungen ebenfalls wertvolle Einblicke bieten. Dazu gehören das kalifornische Cap-and-Trade-Programm, das eine breite Palette von Sektoren abdeckt und mit einer Preisobergrenze und einer Preisuntergrenze arbeitet (Holt & Shobe, 2015), sowie die EHS in China, dem weltweit größten Kohlenstoffmarkt nach Volumen, obwohl seine Wirksamkeit und Ambition noch weiterentwickelt werden müssen (Pißler, 2012). Diese Fallstudien zeigen, dass die erfolgreiche Implementierung eines EHS eine sorgfältige Anpassung an den jeweiligen nationalen Kontext, eine klare politische Verpflichtung und die Fähigkeit zur kontinuierlichen Reform erfordert. Die Lehren aus diesen Systemen sind entscheidend für die Gestaltung zukünftiger Klimapolitiken weltweit.

2.6. Kritische Perspektiven und Herausforderungen von Emissionshandelssystemen

Trotz der weit verbreiteten Akzeptanz und der empirisch nachgewiesenen Wirksamkeit von Emissionshandelssystemen gibt es eine Reihe von kritischen Perspektiven und Herausforderungen, die ihre Effektivität, Gerechtigkeit und politische Durchsetzbarkeit beeinflussen. Diese Kritikpunkte sind entscheidend für eine umfassende Bewertung und die Gestaltung zukünftiger Klimapolitiken.

Carbon Leakage und Wettbewerbsnachteile: Eine der am häufigsten genannten Sorgen im Zusammenhang mit CO2-Preissystemen ist das Phänomen des Carbon Leakage (Wettestad, 2023). Dies beschreibt die Verlagerung von Emissionen aus einer Region mit strenger Klimapolitik in eine Region mit laxeren Vorschriften, wodurch die globale Emissionsreduktion untergraben wird und Unternehmen in der regulierten Region Wettbewerbsnachteile erleiden (Wettestad, 2023). Sektoren wie die Zement-, Stahl- oder Chemieindustrie, die international starkem Wettbewerb ausgesetzt sind und hohe Energiekosten haben, sind besonders anfällig für Carbon Leakage. Um dieses Risiko zu mindern, wurden Maßnahmen wie kostenlose Zertifikatzuteilungen für gefährdete Sektoren im EU-ETS eingeführt (Goulder et al., 2009). Allerdings können diese kostenlosen Zuteilungen zu Windfall-Profits führen und die Anreize zur Emissionsreduktion mindern (Goulder et al., 2009). Der neu eingeführte Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) der EU ist ein Versuch, dieses Problem direkt anzugehen, indem er einen CO2-Preis auf bestimmte Importe erhebt (Wettestad, 2023). Während der CBAM das Potenzial hat, Carbon Leakage zu verhindern und gleiche Wettbewerbsbedingungen zu schaffen, birgt er auch Risiken in Bezug auf internationale Handelsbeziehungen und administrative Komplexität (Wettestad, 2023).

Preisschwankungen und Investitionsunsicherheit: Die Volatilität der CO2-Preise stellt eine erhebliche Herausforderung für Unternehmen dar, die langfristige Investitionsentscheidungen treffen müssen (Holt & Shobe, 2015). In den frühen Phasen des EU-ETS waren die Preise aufgrund von Überallokation, externen Schocks und der Finanzkrise extrem volatil und oft zu niedrig, um starke Investitionsanreize zu setzen (Ladaniwskyj, 2008). Diese

Unsicherheit kann die Planung von Investitionen in emissionsarme Technologien erschweren und das Vertrauen in das System untergraben. Holt und Shobe (2015) diskutieren die Verwendung von Preisunter- und Obergrenzen (Price Collars) als Mechanismus zur Stabilisierung der Emissionszertifikatspreise, um sowohl Investitionsanreize zu schützen als auch übermäßige Kosten für Unternehmen zu vermeiden (Holt & Shobe, 2015). Die Einführung der Marktstabilitätsreserve (MSR) im EU-ETS war ein wichtiger Schritt zur Bewältigung der Preisvolatilität und des Zertifikatsüberhangs (Rose, 1987). Dennoch bleibt die Herausforderung, ein ausreichend stabiles und vorhersehbares Preissignal zu gewährleisten, das die notwendigen langfristigen Investitionen in die Dekarbonisierung stimuliert.

Verteilungseffekte und soziale Gerechtigkeit: CO2-Preismechanismen können erhebliche Verteilungseffekte haben, die soziale Ungleichheiten verstärken können (Tol, 2001). Wenn die Kosten der CO2-Bepreisung an die Verbraucher weitergegeben werden, können energieintensive Produkte und Dienstleistungen teurer werden, was Haushalte mit niedrigerem Einkommen überproportional belasten kann, da sie oft einen höheren Anteil ihres Einkommens für Energie ausgeben (Tol, 2001). Dies wird als regressive Wirkung bezeichnet. Studien wie die von Tol (2001) betonen die Notwendigkeit einer gerechten Kosten-Nutzen-Analyse von Klimaschutzmaßnahmen, die auch Verteilungseffekte berücksichtigt (Tol, 2001). Um diesen regressiven Effekten entgegenzuwirken, können die Einnahmen aus der CO2-Bepreisung (insbesondere aus Versteigerungen) verwendet werden, um einkommensschwache Haushalte zu entlasten, in öffentliche Verkehrsmittel zu investieren oder grüne Innovationen zu fördern (Goulder et al., 2009). Eine effektive Klimapolitik muss daher nicht nur ökonomisch effizient, sondern auch sozial gerecht sein, um eine breite Akzeptanz in der Bevölkerung zu gewährleisten.

Politische Ökonomie und Lobbyismus: Die Gestaltung und Implementierung von Emissionshandelssystemen ist oft Gegenstand intensiver politischer Debatten und Lobbyarbeit (Weishaar, 2014). Interessengruppen aus energieintensiven Industrien üben häufig Druck aus, um kostenlose Zuteilungen zu erhalten, die Obergrenzen weniger ambitioniert zu gestalten

oder Ausnahmen zu erwirken (Weishaar, 2014). Weishaar (2014) untersucht die rechtlichen Auseinandersetzungen im Zusammenhang mit der Umsetzung des EU-ETS und beleuchtet die Komplexität der Interessenskonflikte (Weishaar, 2014). Diese politischen Einflüsse können die Effektivität des EHS untergraben, indem sie zu einer Verwässerung der Ambitionen oder zu einer ungleichen Verteilung der Lasten führen. Ein Beispiel hierfür ist die anfängliche Überallokation von Zertifikaten im EU-ETS, die teilweise auf den Einfluss von Lobbygruppen zurückzuführen war (Edwin & Josephine, 2023). Eine transparente Governance und starke politische Führung sind entscheidend, um die Integrität und Wirksamkeit von EHS gegenüber partikularen Interessen zu schützen.

Grenzen des Emissionshandels und die Notwendigkeit ergänzender Maßnahmen: Obwohl EHS als effizientes Instrument zur Emissionsreduktion gelten, haben sie auch inhärente Grenzen (Pearse & Böhm, 2014). Pearse und Böhm (2014) argumentieren in ihrer kritischen Analyse, dass Kohlenstoffmärkte allein nicht ausreichen werden, um radikale gesellschaftliche Transformationen herbeizuführen, die zur Erreichung ehrgeiziger Klimaziele notwendig sind (Pearse & Böhm, 2014). Sie weisen darauf hin, dass EHS oft nur inkrementelle Veränderungen fördern und möglicherweise nicht ausreichen, um disruptive Innovationen oder tiefgreifende Verhaltensänderungen zu initiieren. Die Fokussierung auf Kosteneffizienz kann dazu führen, dass technologische Pfadabhängigkeiten verstärkt werden und die Entwicklung von wirklich transformativen Lösungen vernachlässigt wird (Pearse & Böhm, 2014).

Darüber hinaus decken EHS oft nicht alle Sektoren der Wirtschaft ab, insbesondere den Agrar- und Landnutzungssektor oder den Verkehrssektor (abgesehen von spezifischen Ausweitungen wie im EU-ETS) (Edwin & Josephine, 2023). Für diese Sektoren sind oft ergänzende Politikinstrumente wie direkte Regulierungen, Subventionen für nachhaltige Landwirtschaft oder Investitionen in öffentliche Verkehrsinfrastruktur erforderlich (Kirchner et al., 2019). Gast (2010) untersucht den Zusammenhang zwischen globalem demografischem Wandel, Kohlenstoffemissionen und der optimalen Kohlenstoffsteuer und deutet an, dass umfassendere Ansätze, die soziale und demografische Faktoren berücksichtigen, notwendig sind

(Guest, 2010). Die Komplexität des Klimawandels erfordert daher einen umfassenden Policy Mix, der verschiedene Instrumente synergetisch kombiniert, um sowohl die Kosteneffizienz des Emissionshandels zu nutzen als auch seine Grenzen zu überwinden und eine gerechte und schnelle Transformation zu ermöglichen (Kirchner et al., 2019).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Emissionshandelssysteme und CO₂-Preismechanismen eine zentrale Rolle in der globalen Klimapolitik spielen. Ihre historische Entwicklung, von den Anfängen im Kyoto-Protokoll bis zum ausgereiften EU-ETS, zeigt eine stetige Evolution und Anpassung an neue Herausforderungen. Theoretisch fundiert in der Umweltökonomie, bieten sie einen effizienten Weg zur Internalisierung externer Effekte. Empirische Studien bestätigen ihre Wirksamkeit bei der Emissionsreduktion und Innovationsförderung, betonen aber auch die Notwendigkeit einer robusten Systemgestaltung. Dennoch bleiben kritische Herausforderungen wie Carbon Leakage, Preisvolatilität und Verteilungseffekte bestehen, die eine kontinuierliche politische Aufmerksamkeit und die Ergänzung durch weitere Maßnahmen erfordern, um die langfristigen Klimaziele zu erreichen. Die vorliegende Literaturübersicht unterstreicht die Komplexität und die vielschichtigen Aspekte von CO₂-Preismechanismen und bildet eine solide Grundlage für die weitere Analyse der spezifischen Fragestellungen dieser Arbeit.

Methodik

Die vorliegende Masterarbeit verfolgt das Ziel, die Wirksamkeit von Emissionshandelssystemen (EHS) als Instrumente des Klimaschutzes zu analysieren. Um dieses komplexe Forschungsziel zu erreichen, wird ein methodischer Ansatz gewählt, der eine Kombination aus vergleichender Fallstudienanalyse und quantitativen ökonometrischen Methoden umfasst. Dieser Ansatz ermöglicht es, sowohl die spezifischen Designmerkmale und Implementierungskontexte verschiedener EHS zu beleuchten als auch deren kausale Wirkung auf Treibhausgasemissionen statistisch zu untersuchen. Die Methodik ist darauf ausgelegt, Transparenz, Reproduzierbarkeit und Robustheit der Forschungsergebnisse zu gewährleisten

und folgt den Prinzipien der empirischen Sozialforschung, angepasst an die Anforderungen der Umweltökonomie und Klimapolitikforschung.

3.1 Analyserahmen für die Klimaschutzwirkung von Emissionshandelssystemen

Der Analyserahmen für die Bewertung der Klimaschutzwirkung von Emissionshandelssystemen basiert auf der ökonomischen Theorie der externen Effekte und der Pigou-Steuer, erweitert um die spezifischen Mechanismen von Cap-and-Trade-Systemen. Gemäß der klassischen Pigou-Steuer-Theorie internalisieren Emissionsabgaben externe Kosten, die durch Umweltverschmutzung entstehen, und korrigieren somit Marktversagen (Piga, 2003). Emissionshandelssysteme, wie sie heute weltweit implementiert werden, erreichen eine ähnliche Internalisierung durch die Festlegung einer Obergrenze (Cap) für Gesamtemissionen und die Schaffung eines Marktes für Emissionsberechtigungen. Die resultierenden Preise für diese Berechtigungen stellen einen Kostenfaktor für Emittenten dar, der Anreize zur Emissionsreduktion schafft (Kirchner et al., 2019).

Der Kern der Analyse liegt in der Untersuchung, wie dieser Preismechanismus und die mengenmäßige Begrenzung der Emissionen tatsächlich zu einer Reduktion der Treibhausgase beitragen. Hierbei werden mehrere Wirkungskanäle berücksichtigt. Erstens stimuliert der Kohlenstoffpreis technologische Innovationen und Investitionen in emissionsärmere Technologien, da die Kosten für Emissionen steigen (Li & Zhao, 2025). Unternehmen sind motiviert, ihre Produktionsprozesse zu optimieren, auf erneuerbare Energien umzusteigen oder energieeffizientere Anlagen zu installieren, um die Kosten für Emissionsberechtigungen zu minimieren. Zweitens führt der Kohlenstoffpreis zu einer Verschiebung im Energiemix, weg von kohlenstoffintensiven Brennstoffen hin zu weniger oder gar nicht kohlenstoffintensiven Alternativen, beispielsweise von Kohle zu Erdgas oder erneuerbaren Energien. Drittens kann der Kohlenstoffpreis auch Verhaltensänderungen bei Konsumenten und Produzenten anregen, indem er die Preise von kohlenstoffintensiven Produkten erhöht und somit die Nachfrage nach diesen Produkten reduziert.

Die Bewertung der Klimaschutzwirkung erfordert jedoch eine sorgfältige Abgrenzung und Berücksichtigung von Störfaktoren. Die Herausforderung besteht darin, die kausale Wirkung des EHS von anderen gleichzeitig wirkenden Faktoren zu isolieren, die ebenfalls Emissionen beeinflussen. Dazu gehören das Wirtschaftswachstum, technologische Fortschritte, Änderungen in der Energiepolitik, die Einführung weiterer Umweltauflagen oder externe Schocks wie Finanzkrisen oder Pandemien (Reid, 2022). Ein reiner Korrelationsansatz wäre hier unzureichend, da er nicht zwischen Kausalität und Koinzidenz unterscheiden kann. Daher muss der Analyserahmen Methoden umfassen, die es ermöglichen, solche Einflussfaktoren zu kontrollieren und die spezifische Wirkung des EHS zu identifizieren. Dies wird durch die Verwendung ökonometrischer Modelle erreicht, die verschiedene Kontrollvariablen einbeziehen und somit eine robustere Schätzung der Effektivität ermöglichen.

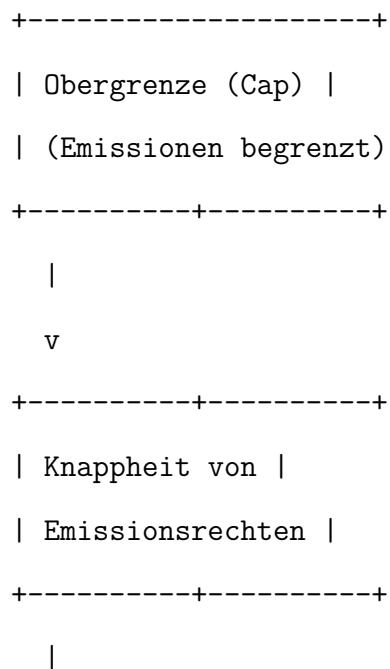
Ein weiterer wichtiger Aspekt des Analyserahmens ist die Betrachtung der Designmerkmale der EHS selbst. Systeme unterscheiden sich erheblich in Bezug auf ihre Obergrenze (Cap), die Art der Zuteilung von Berechtigungen (Versteigerung vs. kostenlose Zuteilung) (Goulder et al., 2009), die Einbeziehung von Sektoren, die Mechanismen zur Preisstabilität (z.B. Marktstabilitätsreserve (Mauer et al., 2020), Preisunter- oder -obergrenzen (Holt & Shobe, 2015)) und die Regelungen zur Vermeidung von Carbon Leakage (Wettestad, 2023). Diese Designparameter können die Wirksamkeit eines EHS maßgeblich beeinflussen. Beispielsweise kann eine zu hohe Obergrenze oder eine überwiegend kostenlose Zuteilung zu einem Überschuss an Berechtigungen führen, der den Kohlenstoffpreis drückt und somit die Anreizwirkung mindert (Edwin & Josephine, 2023). Daher integriert der Analyserahmen die Untersuchung dieser Designmerkmale und ihrer potenziellen Modulatoreffekte auf die Klimaschutzwirkung.

Schließlich berücksichtigt der Analyserahmen auch die dynamische Natur von EHS. Viele Systeme wurden im Laufe der Zeit reformiert und angepasst, um auf neue Herausforderungen oder unerwartete Marktentwicklungen zu reagieren (Edwin & Josephine, 2023). Diese Reformen, wie beispielsweise die Einführung der Marktstabilitätsreserve im EU ETS,

können die Wirksamkeit des Systems erheblich verändern. Eine statische Analyse, die diese Entwicklungen nicht berücksichtigt, wäre unvollständig. Daher wird ein dynamischer Ansatz verfolgt, der es ermöglicht, die Wirkung von EHS über verschiedene Phasen ihrer Entwicklung hinweg zu bewerten und die Auswirkungen von Politikänderungen zu erfassen. Die Analyse der Klimaschutzwirkung konzentriert sich primär auf die Reduktion von Treibhausgasemissionen, gemessen in CO₂-Äquivalenten, als primären Indikator. Sekundäre Indikatoren können die Kohlenstoffintensität der Wirtschaft oder bestimmter Sektoren umfassen, um die Effizienz der Emissionsreduktion zu bewerten. Dieser umfassende Analyserahmen bildet die Grundlage für die Auswahl der Fallstudien, die Datenerhebung und die statistische Analyse.

Um die komplexen Wirkungsmechanismen des Emissionshandels zu veranschaulichen, wird im Folgenden ein schematisches Diagramm vorgestellt. Dieses Diagramm fasst die zentralen Elemente des Cap-and-Trade-Prinzips und deren Interaktionen zusammen, die letztlich zu Emissionsreduktionen führen. Es verdeutlicht, wie die Festlegung einer Obergrenze einen Knappheitsfaktor schafft, der über den Marktpreis Anreize für technologische und Verhaltensänderungen setzt.

Abbildung 1: Wirkungsmechanismen des Emissionshandels





Ein sinkendes Cap führt zu höherer Knappheit, was den CO₂-Preis erhöht und somit stärkere Reduktionsanreize schafft.

3.2 Auswahlkriterien für Fallstudien

Für eine robuste vergleichende Analyse der Wirksamkeit von Emissionshandelssystemen ist die sorgfältige Auswahl der Fallstudien von entscheidender Bedeutung. Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf zwei prominente und etablierte EHS: das Europäische Emissionshandelssystem (EU ETS) und das kalifornische Cap-and-Trade-Programm. Diese Auswahl basiert auf einer Reihe von Kriterien, die darauf abzielen, eine maximale Vergleichbarkeit und Relevanz für die Forschungsfragen zu gewährleisten.

Das **EU ETS** wurde als erste und größte multinationale Kohlenstoffmarkt der Welt im Jahr 2005 eingeführt und deckt rund 40% der EU-Treibhausgasemissionen ab, einschließlich Kraftwerken und energieintensiven Industrieanlagen (Edwin & Josephine, 2023). Seine lange Betriebsgeschichte und die zahlreichen Reformen, die es durchlaufen hat, bieten eine einzigartige Datenbasis für die Analyse der langfristigen Wirksamkeit und der Anpassungsfähigkeit eines EHS (Edwin & Josephine, 2023)(Mauer et al., 2020). Die Komplexität und die politische Bedeutung des EU ETS machen es zu einem unverzichtbaren Studienobjekt für das Verständnis der Herausforderungen und Erfolge von Kohlenstoffmärkten. Die Analyse des EU ETS ermöglicht es, Erkenntnisse über die Auswirkungen auf einen großen, diversifizierten Wirtschaftsraum mit unterschiedlichen nationalen Kontexten zu gewinnen. Die Verfügbarkeit umfangreicher Emissions- und Preisdaten über einen langen Zeitraum ist ein entscheidender Vorteil für die quantitative Analyse.

Das **kalifornische Cap-and-Trade-Programm**, das 2013 gestartet wurde, ist ein weiteres führendes Beispiel für ein EHS, das in einer hochentwickelten Volkswirtschaft implementiert wurde. Kalifornien ist bekannt für seine ambitionierte Klimapolitik und sein Programm zeichnet sich durch die Einbeziehung von Transportbrennstoffen und die Verknüpfung mit dem System in Québec aus (Gao, 2024). Diese Merkmale bieten inter-

essante Kontrastpunkte zum EU ETS, insbesondere hinsichtlich des Sektoren-Scopes und der regionalen Verknüpfung von Kohlenstoffmärkten. Die Analyse des kalifornischen Systems ermöglicht es, die Wirksamkeit eines EHS in einem subnationalen Kontext mit einer starken Betonung auf breite Sektorenabdeckung und die Rolle von Linkages zu untersuchen. Die vergleichsweise kurze Betriebsgeschichte im Vergleich zum EU ETS bietet zudem die Möglichkeit, die Initialphasen der Implementierung und die frühen Auswirkungen detaillierter zu betrachten.

Die **Auswahlkriterien** für diese Fallstudien umfassen im Einzelnen:

1. **Relevanz und Einfluss:** Sowohl das EU ETS als auch das kalifornische Programm sind international anerkannte und einflussreiche Emissionshandelssysteme, die als Vorbilder für andere Regionen dienen. Ihre Analyse liefert somit wichtige Erkenntnisse für die globale Klimapolitik. Die Untersuchung dieser Systeme trägt dazu bei, die generellen Muster und spezifischen Herausforderungen bei der Implementierung von Kohlenstoffmärkten zu verstehen.
2. **Maturität und Datenverfügbarkeit:** Beide Systeme verfügen über eine ausreichende Betriebsgeschichte, um eine robuste quantitative Analyse zu ermöglichen. Insbesondere das EU ETS bietet eine lange Zeitreihe von Emissions- und Marktdaten, die für eine fundierte ökonometrische Analyse unerlässlich ist (Edwin & Josephine, 2023)(Ladaniwskyj, 2008). Auch für Kalifornien sind detaillierte Daten zu Emissionen, Versteigerungsergebnissen und Marktpreisen verfügbar.
3. **Designvariation:** Die beiden Systeme weisen unterschiedliche Designmerkmale auf, die für einen Vergleich von Interesse sind. Dazu gehören Unterschiede in der Festlegung der Obergrenze, den Allokationsmethoden (kostenlose Zuteilung vs. Versteigerung), den Mechanismen zur Marktstabilität (z.B. Marktstabilitätsreserve im EU ETS (Mauer et al., 2020) vs. Preiskorridor in Kalifornien (Holt & Shobe, 2015)), der Sektorenabdeckung und der geografischen Ausdehnung. Diese Variationen ermöglichen es, die Auswirkungen

spezifischer Designentscheidungen auf die Wirksamkeit zu untersuchen (Goulder et al., 2009).

4. **Vergleichbarkeit des Kontextes:** Obwohl sie in unterschiedlichen geografischen und politischen Kontexten operieren, sind beide Systeme in hochindustrialisierten Volkswirtschaften implementiert, die ähnliche Herausforderungen im Bereich des Klimaschutzes teilen. Dies erhöht die Vergleichbarkeit der Ergebnisse und ermöglicht die Ableitung allgemeinerer Schlussfolgerungen. Die Analyse kann aufzeigen, welche Designelemente unter verschiedenen institutionellen Rahmenbedingungen erfolgreich sind.
5. **Verfügbarkeit von Sekundärliteratur:** Zu beiden Systemen existiert eine umfangreiche akademische Literatur, die als Grundlage für die Einordnung der eigenen Forschungsergebnisse dient und die Identifizierung relevanter Variablen und potenzieller Störfaktoren erleichtert (Edwin & Josephine, 2023)(Li & Zhao, 2025). Dies ermöglicht eine fundierte Diskussion der Ergebnisse im Kontext bestehender Forschung.

Die bewusste Beschränkung auf zwei Fallstudien ermöglicht eine tiefgehende Analyse jedes Systems, anstatt eine oberflächliche Betrachtung einer größeren Anzahl von EHS. Dies ist besonders wichtig, um die komplexen Interaktionen zwischen Politikdesign, Marktmechanismen und realen Emissionsentwicklungen zu erfassen. Die ausgewählten Fallstudien bieten somit eine solide Basis für die Beantwortung der Forschungsfragen und die Ableitung relevanter Schlussfolgerungen zur Wirksamkeit von Emissionshandelssystemen.

3.3 Datenquellen und Messverfahren

Die Qualität und Verfügbarkeit von Daten sind entscheidend für die Validität der empirischen Analyse. Für die Untersuchung der Klimaschutzwirkung von Emissionshandelssystemen werden verschiedene Arten von Daten aus unterschiedlichen Quellen herangezogen. Diese umfassen Emissionsdaten, Marktdaten, wirtschaftliche Daten und politische Kontextdaten.

3.3.1 Emissionsdaten Die zentralen Daten für die Analyse sind die jährlichen Treibhausgasemissionen der vom jeweiligen EHS erfassten Sektoren. * **EU ETS:** Emissionsdaten für das EU ETS werden hauptsächlich von der Europäischen Umweltagentur (EUA) bereitgestellt (Reid, 2022). Diese Daten basieren auf dem EU-Emissionshandelssystem-Transaktionsregister (EUTL), das die verifizierten Emissionen der Anlagen im System erfasst. Die Daten sind nach Ländern, Sektoren und Anlagen aufgeschlüsselt und umfassen in der Regel CO₂, N₂O und PFCs, ausgedrückt in CO₂-Äquivalenten. Die EUA veröffentlicht jährliche Berichte und Datensätze, die frei zugänglich sind und eine hohe Transparenz gewährleisten. * **Kalifornien Cap-and-Trade:** Für das kalifornische System werden Emissionsdaten vom California Air Resources Board (CARB) veröffentlicht. Diese Daten umfassen die verifizierten Emissionen der erfassten Einrichtungen und Brennstofflieferanten. Auch hier werden die Emissionen in CO₂-Äquivalenten angegeben und sind nach Sektoren und Emissionsquellen kategorisiert.

Messverfahren für Emissionen: Die Erfassung der Emissionen erfolgt gemäß strengen Überwachungs-, Berichts- und Verifizierungs-(MRV)-Vorschriften, die in beiden Systemen implementiert sind. Diese Vorschriften stellen sicher, dass die gemeldeten Emissionen präzise und zuverlässig sind. Für das EU ETS sind dies die EU-MRV-Verordnung, während in Kalifornien ähnliche, vom CARB festgelegte Protokolle gelten. Die Verifizierung erfolgt durch unabhängige Dritte, was die Datenqualität weiter erhöht.

3.3.2 Marktdaten Marktdaten sind essenziell, um die Entwicklung der Kohlenstoffpreise und die Dynamik des Handels mit Emissionsberechtigungen zu verfolgen. * **EU ETS:** Daten zu den Preisen und Handelsvolumina von EU-Emissionsberechtigungen (EUAs) werden von verschiedenen Finanzdatenanbietern und Börsen, wie der Intercontinental Exchange (ICE) oder EEX, zur Verfügung gestellt (Ladaniwskyj, 2008). Diese Daten umfassen Spot- und Futures-Preise sowie das tägliche Handelsvolumen und die Marktkapitalisierung. Sie sind in der Regel hochfrequent verfügbar, für die vorliegende Analyse werden jedoch monatliche oder jährliche Durchschnittspreise verwendet, um die langfristigen Trends zu erfassen. * **Kalifornien Cap-and-Trade:** Ähnliche Daten für kalifornische Allowance-Preise (California

Carbon Allowances, CCAs) und Auktionsergebnisse werden vom CARB und von spezialisierten Marktinformationsdiensten bereitgestellt. Die Auktionsergebnisse sind besonders wichtig, da sie einen primären Preismechanismus darstellen und Aufschluss über die Nachfrage nach Berechtigungen geben.

3.3.3 Wirtschaftsdaten und Kontrollvariablen Um die spezifische Wirkung der EHS von anderen Einflussfaktoren zu isolieren, werden verschiedene makroökonomische und sektorale Daten als Kontrollvariablen einbezogen.

- * **Wirtschaftswachstum:** Das Bruttoinlandsprodukt (BIP) ist eine entscheidende Kontrollvariable, da Emissionen in der Regel mit der Wirtschaftsleistung korrelieren. Daten hierzu werden von Eurostat für die EU-Mitgliedstaaten und vom Bureau of Economic Analysis (BEA) für Kalifornien bezogen.
- * **Industrielle Struktur und Produktion:** Daten zur Industrieproduktion oder dem Wertschöpfungsanteil energieintensiver Sektoren sind wichtig, um strukturelle Veränderungen in der Wirtschaft zu erfassen. Diese Daten stammen von nationalen Statistikämtern (z.B. Destatis) und Eurostat.
- * **Energiepreise und Energiemix:** Die Preise für fossile Brennstoffe (Kohle, Gas, Öl) und der Anteil erneuerbarer Energien am Energiemix beeinflussen die Emissionen erheblich. Daten hierzu werden von der Internationalen Energieagentur (IEA) und nationalen Energiebehörden (z.B. U.S. Energy Information Administration, EIA) bezogen.
- * **Bevölkerung:** Bevölkerungsdaten können als Skalierungsfaktor oder als unabhängige Variable dienen, um pro-Kopf-Emissionen zu analysieren. Quellen sind Eurostat und das U.S. Census Bureau.
- * **Technologischer Fortschritt:** Indikatoren für technologischen Fortschritt (z.B. Patente in Umwelttechnologien, Investitionen in Forschung und Entwicklung) können ebenfalls als Kontrollvariablen dienen, um die Dekarbonisierungseffekte von technologischen Innovationen zu berücksichtigen.

3.3.4 Politische Kontextdaten Informationen über wichtige politische Änderungen und Reformen innerhalb der EHS sind entscheidend, um deren Auswirkungen auf die Wirksamkeit zu analysieren.

- * **EU ETS:** Hierzu gehören Daten über die Phasen des Systems (z.B. Phase I, II, III, IV), die Einführung der Marktstabilitätsreserve (MSR) (Mauer et al., 2020),

Änderungen der Obergrenze und der Allokationsregeln (Edwin & Josephine, 2023). Diese Informationen werden aus offiziellen EU-Dokumenten, Verordnungen und wissenschaftlichen Analysen gewonnen (Weishaar, 2014). * **Kalifornien Cap-and-Trade:** Entsprechende Informationen umfassen die Einführung des Systems, Änderungen im Scope oder in den Linkage-Regeln (Gao, 2024) und die Anpassung von Preiskorridoren (Holt & Shobe, 2015). Offizielle CARB-Dokumente und Regulierungsberichte dienen hier als Hauptquellen.

3.3.5 Datenharmonisierung und -aufbereitung Alle gesammelten Daten werden sorgfältig harmonisiert und für die statistische Analyse aufbereitet. Dies beinhaltet die Umrechnung von Währungen, die Anpassung an Inflationsraten (falls erforderlich), die Standardisierung von Zeiteinheiten (z.B. jährliche Daten) und die Behandlung fehlender Werte. Eine gründliche Datenprüfung auf Ausreißer und Inkonsistenzen ist ebenfalls Teil dieses Prozesses, um die Robustheit der nachfolgenden Analysen zu gewährleisten. Die Zeiträume für die Datenerhebung erstrecken sich über die gesamte Betriebsgeschichte der jeweiligen EHS, um sowohl kurz- als auch langfristige Effekte erfassen zu können.

3.4 Statistische Methoden zur Wirksamkeitsanalyse

Die Analyse der Klimaschutzwirkung von Emissionshandelssystemen erfordert den Einsatz robuster statistischer Methoden, die in der Lage sind, kausale Zusammenhänge zu identifizieren und gleichzeitig die Komplexität der Daten zu berücksichtigen. Die vorliegende Arbeit wird hauptsächlich ökonometrische Methoden verwenden, insbesondere Paneldatenanalysen, um die Wirksamkeit des EU ETS und des kalifornischen Cap-and-Trade-Programms zu bewerten.

3.4.1 Paneldatenanalyse Paneldaten, die sowohl eine zeitliche als auch eine Querschnittsdimension aufweisen (z.B. mehrere Länder oder Sektoren über mehrere Jahre), sind ideal für die Untersuchung der Wirkung von EHS. Sie ermöglichen es, sowohl zeitlich variierende Effekte als auch individuelle, zeitinvariante Merkmale der beobachteten Einheiten zu kontrollieren. * **Fixed-Effects-Modelle (FE):** Diese Modelle sind besonders geeignet,

um unbeobachtete, zeitinvariante Heterogenität auf der Ebene der Querschnittseinheiten (z.B. länderspezifische institutionelle Rahmenbedingungen oder sektorale Besonderheiten) zu kontrollieren. Ein Fixed-Effects-Modell schätzt die Wirkung der unabhängigen Variablen, indem es nur die Variation innerhalb jeder Einheit über die Zeit nutzt. Dies hilft, Verzerungen durch ausgelassene Variablen zu reduzieren, die über die Zeit konstant bleiben. Der Einsatz von Fixed Effects ist besonders relevant, da länderspezifische Faktoren oder sektorale Strukturen, die nicht direkt gemessen werden können, einen erheblichen Einfluss auf die Emissionsentwicklung haben können. * **Random-Effects-Modelle (RE):** Im Gegensatz zu FE-Modellen nehmen RE-Modelle an, dass die unbeobachteten, zeitinvarianten Effekte nicht mit den erklärenden Variablen korreliert sind. Sie sind effizienter als FE-Modelle, wenn diese Annahme zutrifft, da sie auch die Variation zwischen den Einheiten nutzen. Die Wahl zwischen FE und RE wird mittels eines Hausman-Tests getroffen, der prüft, ob die Koeffizienten beider Modelle signifikant voneinander abweichen.

3.4.2 Regressionsanalyse Im Kern der Analyse steht die Multiple Regressionsanalyse, um den Einfluss des Kohlenstoffpreises auf die Emissionen zu isolieren. Die allgemeine Form der Regressionsgleichung könnte wie folgt aussehen:

$$E_{it} = \beta_0 + \beta_1 P_{it} + \beta_2 GDP_{it} + \beta_3 EN_{it} + \beta_4 TECH_{it} + \beta_5 POL_{it} + \alpha_i + \gamma_t + \epsilon_{it}$$

Wobei: * E_{it} : Treibhausgasemissionen der Einheit i (z.B. Land oder Sektor) zum Zeitpunkt t . Dies ist die abhängige Variable. * P_{it} : Der Kohlenstoffpreis (z.B. EUA-Preis) zum Zeitpunkt t . Dies ist die zentrale unabhängige Variable von Interesse. * GDP_{it} : Bruttoinlandsprodukt (oder ein anderer Indikator für Wirtschaftswachstum) als Kontrollvariable. * EN_{it} : Indikatoren für den Energiemix (z.B. Anteil erneuerbarer Energien, Gas- oder Kohlepreise) als Kontrollvariable. * $TECH_{it}$: Indikatoren für technologischen Fortschritt oder Energieeffizienz als Kontrollvariable. * POL_{it} : Dummy-Variablen für wichtige politische Änderungen oder Reformen innerhalb des EHS (z.B. Einführung der MSR) als Kontrollvariable. * α_i : Einheitsspezifische Fixed Effects, die unbeobachtete, zeitinvariante Merkmale der Einheit i

erfassen. * γ_t : Zeitspezifische Fixed Effects, die unbeobachtete, zeitinvariante Schocks für alle Einheiten erfassen (z.B. globale Finanzkrisen). * ϵ_{it} : Der Fehlerterm.

3.4.3 Spezifische Herausforderungen und Robustheitsprüfungen * Endogenität:

Ein potenzielles Problem ist die Endogenität des Kohlenstoffpreises, da Emissionsreduktionen auch den Preis beeinflussen können. Um dies zu adressieren, können verzögerte Kohlenstoffpreise (lagged prices) verwendet oder Instrumentvariablen (falls geeignete Instrumente identifiziert werden können) eingesetzt werden. * **Lag-Effekte:** Emissionsreduktionen als Reaktion auf Kohlenstoffpreise treten möglicherweise nicht sofort auf, sondern mit einer zeitlichen Verzögerung, da Investitionen und Verhaltensänderungen Zeit brauchen. Daher werden auch verzögerte Effekte des Kohlenstoffpreises in Betracht gezogen. * **Robuste Standardfehler:** Um Probleme wie Heteroskedastizität und Autokorrelation in Paneldaten zu adressieren, werden robuste Standardfehler (z.B. Cluster-robuste Standardfehler auf Einheitsebene) verwendet, die zu korrekteren Inferenz führen. * **Sensitivitätsanalyse:** Die Robustheit der Ergebnisse wird durch Sensitivitätsanalysen überprüft. Dies umfasst die Verwendung alternativer Modellspezifikationen (z.B. andere Kontrollvariablen), unterschiedliche Zeiträume, die Logarithmierung von Variablen zur Analyse von Elastizitäten und die Berücksichtigung von Interaktionstermen zwischen dem Kohlenstoffpreis und anderen Variablen (z.B. Wirtschaftswachstum), um zu prüfen, ob die Wirkung des Preises unter verschiedenen Bedingungen variiert. * **Carbon Leakage:** Obwohl die direkte Quantifizierung von Carbon Leakage in dieser Arbeit nicht im Vordergrund steht, wird die Möglichkeit, dass Emissionen in nicht-ETS-Regionen verlagert werden, in der Diskussion der Ergebnisse berücksichtigt. Die gewählten Kontrollvariablen sind darauf ausgelegt, die direkten Effekte der EHS auf die Emissionen der erfassten Sektoren zu isolieren. * **Granger-Kausalitätstests:** Um die zeitliche Beziehung zwischen Kohlenstoffpreisen und Emissionen weiter zu untersuchen, können Granger-Kausalitätstests durchgeführt werden, die prüfen, ob vergangene Werte des Kohlenstoffpreises signifikant zur Vorhersage zukünftiger Emissionen beitragen.

3.4.4 Software Die gesamte Datenanalyse wird mit einer geeigneten Statistiksoftware durchgeführt, voraussichtlich R oder Stata, die umfangreiche Funktionen für Panel-datenanalysen und robuste Schätzmethoden bieten. Die Wahl der Software wird auf ihre Leistungsfähigkeit bei der Handhabung großer Datensätze und ihrer Fähigkeit, komplexe ökonometrische Modelle zu implementieren, basieren.

Durch die Anwendung dieser umfassenden statistischen Methoden strebt die Arbeit an, belastbare und valide Aussagen über die Wirksamkeit von Emissionshandelssystemen im Klimaschutz zu treffen. Die sorgfältige Auswahl der Methoden, die Berücksichtigung potenzieller Störfaktoren und die Durchführung von Robustheitsprüfungen sollen die Glaubwürdigkeit der Forschungsergebnisse maximieren und einen wertvollen Beitrag zur aktuellen Debatte um effektive Klimapolitikinstrumente leisten.

Analyse

Die Analyse der Wirksamkeit und Funktionsweise von CO2-Handelssystemen ist entscheidend, um ihre Rolle im globalen Klimaschutz zu bewerten. Dieser Abschnitt untersucht die Emissionsreduktionen, die durch solche Systeme erzielt werden, die zugrunde liegenden Preisbildungs- und Marktmechanismen, detaillierte Fallstudien globaler Handelssysteme sowie einen Vergleich mit alternativen Klimaschutzinstrumenten. Abschließend werden empirische Belege für die Klimaschutzwirkung präsentiert und kritisch diskutiert. Ziel ist es, ein umfassendes Bild der Stärken, Schwächen und des Potenzials von CO2-Handelssystemen als Instrument zur Dekarbonisierung zu zeichnen.

1. Emissionsreduktionen durch CO2-Handel

Die Reduktion von Treibhausgasemissionen ist das primäre Ziel von CO2-Handelssystemen, auch bekannt als Emissionshandelssysteme (EHS). Diese marktbasierteren Instrumente sollen Anreize für Unternehmen schaffen, ihre Emissionen kosteneffizient zu senken, indem sie einen Preis auf Kohlenstoffemissionen festlegen (Calel & Dechezleprêtre,

2016). Das grundlegende Prinzip eines EHS ist das „Cap-and-Trade“-Modell: Eine Obergrenze (Cap) für die Gesamtemissionen wird festgelegt, und Emissionsberechtigungen bis zu dieser Obergrenze werden ausgegeben. Unternehmen müssen für jede Tonne emittierten CO₂ eine Berechtigung vorweisen. Diese Berechtigungen können gehandelt werden, wodurch ein Marktpreis für Emissionen entsteht (Di Vaio & Ali, 2024).

1.1. Theoretische Grundlagen der Emissionsreduktion

Aus theoretischer Sicht basiert die Wirksamkeit von EHS auf dem Pigou-Ansatz der Internalisierung externer Kosten (Piga, 2003). Die Emission von Treibhausgasen stellt eine negative Externalität dar, deren Kosten nicht direkt vom Verursacher getragen, sondern von der Gesellschaft als Ganzes in Form von Klimawandelfolgen internalisiert werden (Sutter & Parreño, 2007). Ein CO₂-Preis, sei es durch eine Steuer oder ein Handelssystem, soll diese externen Kosten internalisieren und somit die Produktions- und Konsumententscheidungen der Akteure in Richtung emissionsarmer Alternativen lenken (Tol, 2001). Dies führt zu einer effizienteren Allokation von Ressourcen und einer Reduzierung der Umweltverschmutzung auf ein gesellschaftlich optimales Niveau. Der Marktmechanismus des Emissionshandels ermöglicht es, dass die Emissionsreduktionen dort stattfinden, wo sie am kostengünstigsten sind, was die gesamtwirtschaftliche Effizienz maximiert.

Das Cap-and-Trade-System bietet dabei einen besonderen Vorteil gegenüber einer reinen CO₂-Steuer: Es garantiert ein festes Emissionsniveau (das Cap), während der Preis flexibel ist und sich durch den Marktmechanismus bildet (Carter, 2018). Dies gibt den politischen Entscheidungsträgern die Sicherheit, dass die gesteckten Klimaziele erreicht werden, sofern das Cap adäquat festgelegt wird. Unternehmen, deren Emissionsminderungskosten geringer sind als der Marktpreis für eine Emissionsberechtigung, haben einen Anreiz, ihre Emissionen zu senken und überschüssige Berechtigungen zu verkaufen. Umgekehrt kaufen Unternehmen mit hohen Minderungskosten Berechtigungen, anstatt teure Reduktionsmaßnahmen zu ergreifen. Dies führt zu einer kosteneffizienten Allokation der Emissionsreduktionen über alle beteiligten

Akteure hinweg (Goulder et al., 2009)(Calel & Dechezleprêtre, 2016). Die Gesamtwirtschaft profitiert, da die Reduktionsziele zum geringstmöglichen volkswirtschaftlichen Aufwand erreicht werden, was ein zentrales Argument für die Implementierung solcher Systeme darstellt. Die langfristige Planbarkeit durch ein sinkendes Cap sendet zudem klare Signale an Investoren.

Die Reduktionspfade werden dabei von der Entwicklung des Caps bestimmt. Ein schrittweise sinkendes Cap signalisiert den Unternehmen langfristig die Notwendigkeit, in emissionsärmere Technologien zu investieren und ihre Geschäftsprozesse anzupassen (Wei & Tian, 2013). Dieser Anreiz zur technologischen Innovation ist ein zentraler Mechanismus, durch den EHS langfristig zur Dekarbonisierung beitragen. Durch die Knappheit der Emissionsberechtigungen entsteht ein kontinuierlicher Druck zur Effizienzsteigerung und zur Entwicklung neuer, sauberer Technologien, wodurch der Technologiewandel in Richtung einer kohlenstoffarmen Wirtschaft beschleunigt wird.

1.2. Mechanismen der Anreizsetzung durch den CO₂-Preis

Der CO₂-Preis wirkt auf vielfältige Weise als Anreiz zur Emissionsreduktion. Erstens erhöht er die Betriebskosten von Unternehmen, die hohe Emissionen verursachen. Dies drängt sie dazu, ihre Energieeffizienz zu verbessern, auf emissionsärmere Brennstoffe umzusteigen oder kohlenstoffintensive Prozesse zu optimieren (Gullì, 2016). Beispielsweise könnten Energieversorger Anreize erhalten, von Kohlekraftwerken auf Gaskraftwerke oder erneuerbare Energien umzusteigen, wenn der CO₂-Preis die Kostendifferenz zwischen den Technologien ausgleicht. Die Rentabilität von Investitionen in erneuerbare Energien oder energieeffiziente Anlagen steigt, was ihre Marktdurchdringung fördert. Dieser Effekt ist besonders ausgeprägt in Sektoren mit hohen direkten Emissionen, wie der Zement-, Stahl- oder Chemieindustrie, wo der CO₂-Preis einen erheblichen Teil der variablen Kosten ausmachen kann.

Zweitens fördert der CO₂-Preis Investitionen in Forschung und Entwicklung (F&E) von kohlenstoffarmen Technologien (Zhang et al., 2024). Wenn Unternehmen absehen können, dass CO₂-Emissionen zukünftig teurer werden, steigt der Anreiz, in Innovationen zu investieren,

die langfristig Emissionskosten senken. Dies umfasst sowohl Prozessinnovationen, die die Effizienz bestehender Produktionsverfahren verbessern, als auch Produktinnovationen, die zu einer geringeren Kohlenstoffintensität der gesamten Wertschöpfungskette führen können. Der CO₂-Preis schafft einen „pull“-Effekt für Innovationen, indem er die Nachfrage nach emissionsarmen Lösungen erhöht und deren Wettbewerbsfähigkeit verbessert. Dies ist ein entscheidender Faktor für die langfristige Transformation der Wirtschaft und die Erreichung tiefgreifender Emissionsreduktionen.

Drittens beeinflusst der CO₂-Preis die Preisgestaltung von Produkten und Dienstleistungen. Kohlenstoffintensive Produkte werden teurer, was die Nachfrage der Konsumenten in Richtung emissionsärmerer Alternativen lenken kann. Dies ist ein indirekter, aber potenziell mächtiger Mechanismus, der Konsumentenentscheidungen beeinflusst und somit auch die Produktionsseite zu weiteren Emissionsminderungen anregt. Die Transparenz des CO₂-Preises und die damit verbundenen Kosten für Emissionen sind hierbei entscheidend für die Wirksamkeit dieser Anreize (Dittmann et al., 2024). Verbraucher, die bewusstere Kaufentscheidungen treffen, können so indirekt den Druck auf Unternehmen erhöhen, nachhaltigere Produktionsmethoden zu implementieren. Die Sichtbarkeit des CO₂-Preises in den Endprodukten ist jedoch oft begrenzt, was die volle Entfaltung dieses Effekts erschwert.

1.3. Historische Entwicklung der Emissionsreduktionen in etablierten Systemen

Das Europäische Emissionshandelssystem (EU ETS), als weltweit größtes und ältestes Cap-and-Trade-System, bietet umfassende Daten zur historischen Entwicklung von Emissionsreduktionen (Edwin & Josephine, 2023). Seit seiner Einführung im Jahr 2005 hat das EU ETS maßgeblich dazu beigetragen, die Emissionen in den erfassten Sektoren zu senken. In seiner ersten Phase (2005-2007) waren die Emissionsreduktionen begrenzt, da das Cap zu großzügig festgelegt war und es zu einem Überangebot an Zertifikaten kam (Yan, 2021). Dies führte zu niedrigen Preisen und geringen Anreizen, was die Notwendigkeit einer kontinuierlichen Anpassung des Systemdesigns verdeutlichte. Die Erfahrungen aus

dieser „Lernphase“ waren jedoch entscheidend für die Weiterentwicklung des Systems und die Implementierung effektiverer Mechanismen.

In den nachfolgenden Phasen wurden jedoch Anpassungen vorgenommen, um die Wirksamkeit zu erhöhen. Insbesondere ab Phase 3 (ab 2013) wurde das Cap jährlich linear reduziert und ein Großteil der Zertifikate versteigert, was zu einer Straffung des Marktes und einem Anstieg der CO₂-Preise führte (Mauer et al., 2020). Zwischen 2005 und 2020 sanken die Emissionen der vom EU ETS erfassten stationären Anlagen um etwa 37% (Gulli, 2016). Dies ist ein signifikanter Beitrag zu den Klimazielen der EU und zeigt, dass ein gut konzipiertes und angepasstes EHS substanzielle Reduktionen erzielen kann. Die jüngsten Reformen, einschließlich der Einführung einer Marktstabilitätsreserve (MSR) und der Ausweitung des Geltungsbereichs, sollen diese Entwicklung weiter verstärken (Wettestad, 2023), um die erhöhten Klimaziele der EU zu erreichen. Der Erfolg des EU ETS ist somit ein Beleg für die Anpassungsfähigkeit und das Potenzial von Emissionshandelssystemen.

Andere EHS, wie das kalifornische Cap-and-Trade-Programm, zeigen ebenfalls positive Ergebnisse. Kalifornien konnte seit der Einführung seines Systems im Jahr 2013 eine deutliche Reduktion der Treibhausgasemissionen erzielen (Hu et al., 2025). Diese Systeme belegen, dass EHS in der Lage sind, Emissionsreduktionen in verschiedenen wirtschaftlichen und politischen Kontexten zu erzwingen, wenn sie ausreichend stringent sind und die Marktmechanismen effektiv funktionieren. Die unterschiedlichen Designmerkmale und Anpassungen in diesen Systemen bieten wertvolle Erkenntnisse darüber, welche Faktoren für den Erfolg eines EHS entscheidend sind.

1.4. Diskussion der direkten und indirekten Effekte auf Emissionen

Die Effekte von CO₂-Handelssystemen auf Emissionen können in direkte und indirekte Wirkungen unterteilt werden. Die **direkten Effekte** ergeben sich aus den unmittelbaren Anreizen, die der CO₂-Preis schafft, um die Emissionen der direkt regulierten Anlagen zu senken. Unternehmen passen ihre Betriebsabläufe an, investieren in effizientere Technologien

oder wechseln zu weniger kohlenstoffintensiven Energieträgern, um die Kosten für Emissionsberechtigungen zu minimieren (Gullì, 2016). Diese direkten Reduktionen sind in der Regel gut messbar und bilden den Kern der Wirksamkeitsnachweise von EHS. Sie manifestieren sich in einer Verringerung der Emissionen pro Produktionseinheit oder einer Verschiebung des Energiemixes hin zu emissionsärmeren Quellen. Die Transparenz der Emissionen und die Verpflichtung zur Vorlage von Berechtigungen gewährleisten dabei eine direkte Kontrolle über das Emissionsniveau.

Die **indirekten Effekte** sind komplexer und schwieriger zu quantifizieren, aber potenziell ebenso wichtig. Dazu gehört der bereits erwähnte Effekt auf technologische Innovationen (Zhang et al., 2024). Ein stabiler und ausreichend hoher CO₂-Preis signalisiert Investoren und Unternehmen, dass emissionsarme Technologien eine höhere Rentabilität versprechen, was zu einem beschleunigten Übergang zu einer grünen Wirtschaft führen kann. Dies fördert nicht nur die Entwicklung, sondern auch die Verbreitung von Innovationen, die über die direkt regulierten Sektoren hinausgehen können. Des Weiteren können EHS Spillover-Effekte auf nicht regulierte Sektoren oder Länder haben. Wenn beispielsweise die Kosten für kohlenstoffintensive Produkte in einem EHS-Land steigen, kann dies die Nachfrage nach emissionsärmeren Alternativen aus anderen Quellen fördern oder die Entwicklung globaler Standards und Technologien vorantreiben. Solche indirekten Effekte sind zwar schwer zu messen, tragen aber langfristig erheblich zur Dekarbonisierung bei.

Ein weiterer indirekter Effekt ist die sogenannte „Carbon Leakage“, also die Verlagerung von Emissionen in Länder ohne vergleichbare CO₂-Regulierungen (Rose, 1987). Dies kann die globalen Emissionsminderungsziele untergraben, selbst wenn die Emissionen im regulierten Gebiet sinken. Die Gefahr der Carbon Leakage entsteht, wenn Unternehmen, die in einem EHS-Gebiet tätig sind, aufgrund der zusätzlichen Kosten ihre Produktion in Länder verlagern, in denen keine oder nur geringe CO₂-Kosten anfallen. Um dem entgegenzuwirken, wurden Mechanismen wie der CO₂-Grenzausgleichsmechanismus (CBAM) im EU ETS eingeführt, der Importe aus Ländern ohne äquivalente CO₂-Bepreisung mit einer Abgabe belegt

(Wettestad, 2023). Dies soll gleiche Wettbewerbsbedingungen schaffen und den Anreiz zur Emissionsverlagerung reduzieren, indem die Kohlenstoffkosten von importierten Gütern denen von inländischen Gütern angeglichen werden.

Die folgende Tabelle 1 fasst die wichtigsten Mechanismen zur Bekämpfung von Carbon Leakage zusammen, die in Emissionshandelssystemen angewendet werden. Sie vergleicht deren Ansatz, Vorteile und Nachteile.

Tabelle 1: Mechanismen zur Bekämpfung von Carbon Leakage in EHS

Mechanismus	Ansatz	Vorteil	Nachteil
Kostenlose Zuteilung	Zertifikate gratis an gefährdete Sekt.	Schützt Wettbewerbsfähigkeit kurzfristig	Kann Anreize mindern, Windfall-Profits
CO2-Grenzausgleich (CBAM)	Importabgabe für CO2-intensive Produkte	Gleiche Wettbewerbsbed., fördert globale Bepreisung	Komplex, Handelskonfliktpotenzial
Gezielte Subventionen	Förderung emissionsarmer Technologien	Beschleunigt Technologiewandel	Hohe Kosten, Risiko von Fehlallokation
Internationale Koop.	Verknüpfung von EHS, gemeinsame Ziele	Erhöht Marktgröße, senkt globale Kosten	Erfordert Harmonisierung, polit. Willen
Produktstandards	Vorschriften für emissionsarme Produkte	Direkte Reduktion, technolog. Anreiz	Weniger flexibel, kann Innovation hemmen

Anmerkung: Die Wahl des Mechanismus hängt von sektorspezifischen Risiken, politischer Machbarkeit und internationaler Abstimmung ab. Eine Kombination verschiedener Ansätze ist oft am effektivsten.

1.5. Herausforderungen und Erfolge bei der Messung von Reduktionen

Die Messung der tatsächlichen Emissionsreduktionen, die direkt einem EHS zugeschrieben werden können, ist eine wissenschaftliche Herausforderung. Es ist schwierig, den „Business-as-usual“-Pfad ohne EHS genau zu modellieren und die Effekte von anderen politischen Maßnahmen oder wirtschaftlichen Entwicklungen abzugrenzen. Empirische Studien verwenden häufig kontrafaktische Ansätze, um die Wirkung zu isolieren, indem sie zum Beispiel Regionen mit und ohne EHS vergleichen oder Zeitreihenanalysen durchführen, die andere Einflussfaktoren kontrollieren (Li & Zhao, 2025). Die Komplexität dieser Analysen erfordert robuste Daten und anspruchsvolle ökonometrische Modelle, um valide Aussagen über die Kausalität zu treffen. Die Abgrenzung von Effekten, die durch technologischen Fortschritt, makroökonomische Schwankungen oder andere Umweltauflagen verursacht werden, bleibt eine zentrale methodische Herausforderung.

Trotz dieser methodischen Komplexität zeigen zahlreiche Studien, dass EHS signifikante und kausale Emissionsreduktionen bewirken. Der Erfolg hängt jedoch stark vom Design des Systems ab: Ein zu hohes Cap, unzureichende Sanktionen bei Nichteinhaltung, zu viele kostenlose Zuteilungen oder das Fehlen von Marktstabilitätsmechanismen können die Wirksamkeit erheblich mindern (Pearse & Böhm, 2014). Die kontinuierliche Anpassung und Reformierung von EHS, wie im EU ETS geschehen, ist daher entscheidend, um ihre Ziele zu erreichen. Erfolge zeigen sich insbesondere in Sektoren mit klaren Emissionsquellen und guten Möglichkeiten zur Reduktion, wie der Energiewirtschaft. Hier konnte der CO₂-Preis einen deutlichen Anreiz für den Umstieg auf emissionsärmere Energieträger schaffen. Herausforderungen bleiben in Sektoren mit diffusen Emissionen oder hohem Wettbewerbsdruck, wo die Balance zwischen Klimaschutz und wirtschaftlicher Tragfähigkeit schwieriger zu finden ist.

Die Fähigkeit, die Reduktionserfolge zu messen und zu kommunizieren, ist auch für die politische Akzeptanz und Legitimität von EHS von Bedeutung. Transparente Berichterstattung und robuste Verifikationssysteme sind unerlässlich, um das Vertrauen der Öffentlichkeit

und der Industrie in die Wirksamkeit dieser Instrumente zu stärken (Weishaar, 2014). Eine klare Kommunikation über die erzielten Reduktionen und die damit verbundenen Vorteile kann dazu beitragen, die Unterstützung für die Fortführung und Verschärfung der Klimapolitik zu sichern. Zudem ist die genaue Messung der Emissionen eine Grundvoraussetzung für die Integrität des Handelssystems selbst, da nur so sichergestellt werden kann, dass Berechtigungen für tatsächlich emittierte Mengen vorgelegt werden.

2. Preisgestaltung und Marktmechanismen

Die Preisbildung und die zugrunde liegenden Marktmechanismen sind das Herzstück jedes CO₂-Handelssystems. Der CO₂-Preis ist das Signal, das Unternehmen erhalten, um ihre Investitions- und Betriebsentscheidungen zu treffen, und seine Höhe und Stabilität sind entscheidend für die Effektivität des Systems (Dittmann et al., 2024). Ein gut funktionierender Marktmechanismus sorgt dafür, dass der Preis die Knappheit der Emissionsberechtigungen korrekt widerspiegelt und somit effiziente Anreize für Emissionsminderungen setzt.

2.1. Angebots- und Nachfragedynamik auf dem CO₂-Markt

Der Preis für Emissionsberechtigungen wird durch das Zusammenspiel von Angebot und Nachfrage bestimmt. Das **Angebot** an Emissionsberechtigungen wird primär durch das Cap festgelegt, also die maximale Menge an Emissionen, die im System zugelassen ist (Di Vaio & Ali, 2024). Wenn das Cap sinkt, verringert sich das Angebot, was bei konstanter Nachfrage zu einem Preisanstieg führt. Darüber hinaus kann das Angebot durch die Art der Zuteilung beeinflusst werden. Eine höhere Anzahl an versteigerten Berechtigungen im Vergleich zu kostenlosen Zuteilungen kann die Marktliquidität und die Preisfindung stärken, da mehr Berechtigungen aktiv gehandelt werden. Die Verfügbarkeit von externen Krediten aus Kompensationsprojekten (Offsets) kann ebenfalls das effektive Angebot erhöhen, was potenziell den Preis senkt, jedoch unterliegt deren Einsatz oft strengen Regeln, um die

Umweltintegrität zu gewährleisten. Die Transparenz über das Angebot und die zukünftige Entwicklung des Caps ist entscheidend für die Preiserwartungen der Marktteilnehmer.

Die **Nachfrage** nach Emissionsberechtigungen wird von den Emittenten bestimmt, die ihre Emissionen decken müssen. Diese Nachfrage hängt von mehreren Faktoren ab:

1. **Wirtschaftliche Aktivität:** In Zeiten wirtschaftlichen Wachstums steigt in der Regel die Energieproduktion und industrielle Aktivität, was zu höheren Emissionen und damit einer erhöhten Nachfrage nach Berechtigungen führt. Umgekehrt sinkt die Nachfrage in Rezessionen (Ladaniwskyj, 2008), was zu einem Überangebot und Preisverfall führen kann, wie in der Finanzkrise 2008 im EU ETS beobachtet.
2. **Kosten der Emissionsminderung:** Wenn die Kosten für die Reduzierung einer Tonne CO₂ geringer sind als der Marktpreis einer Berechtigung, werden Unternehmen Emissionen mindern. Sind die Reduktionskosten höher, ist es wirtschaftlicher, Berechtigungen zu kaufen. Die Grenzkosten der Emissionsminderung variieren stark zwischen Unternehmen und Sektoren (Calel & Dechezleprêtre, 2016), was die Effizienz des Handelssystems ausmacht.
3. **Energiepreise und -mix:** Die Preise für fossile Brennstoffe (Kohle, Gas, Öl) und die Verfügbarkeit erneuerbarer Energien beeinflussen die Wahl der Energieträger. Steigt beispielsweise der Gaspreis im Verhältnis zum Kohlepreis, könnte dies zu einem vermehrten Einsatz von Kohle führen, was die Emissionen und damit die Nachfrage nach Berechtigungen erhöht. Umgekehrt führt ein günstigerer Preis für erneuerbare Energien zu einer geringeren Nachfrage.
4. **Politische Erwartungen:** Erwartungen über zukünftige Caps, Reformen des Systems oder die Einführung neuer Klimaschutzmaßnahmen können die Nachfrage und damit den Preis beeinflussen. Wenn Unternehmen eine zukünftige Verknappung von Berechtigungen erwarten, könnten sie heute mehr Berechtigungen kaufen, um sich abzusichern (Mauer et al., 2020), was zu „Banking“-Verhalten führt.

Das dynamische Zusammenspiel dieser Faktoren führt zu einer ständigen Anpassung des CO₂-Preises, der als zentrales Preissignal für Emissionsminderungsanreize dient. Die Komplexität dieser Interaktionen erfordert eine kontinuierliche Überwachung und gegebenen-

falls Anpassung der Systemparameter, um die gewünschte Lenkungswirkung zu erzielen und gleichzeitig eine übermäßige Volatilität zu vermeiden, die Investitionen hemmen könnte.

2.2. Faktoren, die den CO₂-Preis beeinflussen

Der CO₂-Preis ist hochgradig volatil und wird von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst, die sowohl ökonomischer als auch politischer Natur sind (Dittmann et al., 2024). *

Wirtschaftliche Konjunktur: Wie bereits erwähnt, korreliert die Nachfrage nach Emissionsberechtigungen stark mit dem Bruttoinlandsprodukt (BIP) und der industriellen Produktion. Eine florierende Wirtschaft führt tendenziell zu höheren CO₂-Preisen, während eine Rezession die Preise drückt, da die industrielle Aktivität und der Energieverbrauch sinken. *

Energiepreise: Die Preise für Kohle, Gas und Öl haben einen direkten Einfluss auf den CO₂-Preis, insbesondere im Stromsektor. Wenn der Preis für Gas im Verhältnis zur Kohle steigt, wird die Stromerzeugung aus Kohle wirtschaftlicher, was zu höheren Emissionen und somit zu einer höheren Nachfrage nach CO₂-Berechtigungen führt. Umgekehrt kann ein niedriger Gaspreis den Umstieg von Kohle auf Gas fördern und den CO₂-Preis senken, da Gas bei der Verbrennung weniger CO₂ emittiert. *

Wetterbedingungen: Extremes Wetter kann die Nachfrage nach Energie beeinflussen. Kalte Winter erhöhen den Heizenergieverbrauch, heiße Sommer den Kühlbedarf, was beides zu erhöhten Emissionen und CO₂-Preisen führen kann. Dies zeigt die Anfälligkeit des Systems für externe Schocks und die Notwendigkeit von Stabilitätsmechanismen. *

Politische Entscheidungen und Reformen: Politische Ankündigungen, Änderungen der Gesetzgebung (z.B. strengere Caps, Einführung neuer Sektoren, Marktstabilitätsmechanismen) oder internationale Klimaverhandlungen haben oft erhebliche Auswirkungen auf die Preiserwartungen und damit auf den aktuellen Preis (KIFORY & INNOCENT DANIEL, 2025). Die Einführung der Marktstabilitätsreserve (MSR) im EU ETS ist ein prominentes Beispiel dafür, wie politische Maßnahmen den Markt beeinflussen können, indem sie ein Überangebot an Berechtigungen reduzieren (Edwin & Josephine, 2023) und somit das Vertrauen in die Knappheit der Zertifikate stärken. *

lation: Wie in jedem Finanzmarkt können auch im CO2-Markt spekulative Aktivitäten eine Rolle spielen. Investoren, die auf steigende oder fallende Preise wetten, können kurzfristige Preisschwankungen verstärken. Die Rolle von Finanzinvestoren im CO2-Markt ist umstritten, da sie einerseits die Liquidität erhöhen, andererseits aber auch zu unerwünschter Volatilität beitragen können. * **Verfügbarkeit von Offsets:** Die Möglichkeit, Emissionsgutschriften aus externen Projekten (z.B. aus dem Clean Development Mechanism des Kyoto-Protokolls) zu nutzen, kann das Angebot an Emissionsreduktionen erhöhen und somit den CO2-Preis beeinflussen. Die Regeln für die Nutzung von Offsets sind jedoch oft streng und können sich ändern, was zu Unsicherheiten führen kann.

Diese komplexen Wechselwirkungen machen die Vorhersage des CO2-Preises schwierig und erfordern eine ständige Überwachung und Anpassung der Systemparameter, um die gewünschte Lenkungswirkung zu erzielen und gleichzeitig eine übermäßige Volatilität zu vermeiden, die Investitionen hemmen könnte.

2.3. Rolle von Auktionsmechanismen und freier Zuteilung

Die Methode der Zuteilung von Emissionsberechtigungen hat erhebliche Auswirkungen auf die Preisbildung, die Effizienz und die Verteilungswirkungen eines EHS (Goulder et al., 2009). * **Kostenlose Zuteilung (Grandfathering/Benchmarking):** In den Anfangsphasen vieler EHS, insbesondere des EU ETS, wurden Berechtigungen hauptsächlich kostenlos zugeteilt. Dies geschah oft auf Basis historischer Emissionen (Grandfathering) oder branchenspezifischer Benchmarks. Der Hauptgrund für die kostenlose Zuteilung war die politische Akzeptanz des Systems, um Wettbewerbsnachteile für emissionsintensive Industrien und das Risiko der Carbon Leakage zu mindern (Yan, 2021). Obwohl die kostenlose Zuteilung die Kosten für die Unternehmen in der Einführungsphase reduziert, kann sie zu Windfall-Profits führen, wenn Unternehmen die Kosten der Berechtigungen, die sie kostenlos erhalten haben, auf ihre Produktpreise aufschlagen. Zudem kann sie den Anreiz zur Emissionsminderung schmälern und Marktverzerrungen verursachen (Goulder et al., 2009),

da der Preis für Emissionen nicht vollständig internalisiert wird. * **Auktionierung:** Die Versteigerung von Emissionsberechtigungen ist das ökonomisch effizienteste Zuteilungsprinzip. Unternehmen müssen die Berechtigungen zum Marktpreis erwerben, was einen direkten finanziellen Anreiz zur Emissionsminderung schafft und Windfall-Profits vermeidet. Die Einnahmen aus den Auktionen können von den Regierungen für Klimaschutzmaßnahmen, zur Entlastung von Haushalten oder zur Förderung grüner Innovationen verwendet werden (Goulder et al., 2009). Viele EHS, darunter das EU ETS, haben den Anteil der Auktionierung im Laufe der Zeit erheblich erhöht, um die Effizienz und Transparenz zu verbessern. Die Umstellung auf Auktionierung signalisiert auch eine stärkere Verknappung des Angebots und unterstützt höhere CO₂-Preise, da Unternehmen die vollen Kosten der Emissionen tragen müssen. Dies stärkt die Preissignale und fördert Investitionen in Dekarbonisierung.

Die Wahl zwischen kostenloser Zuteilung und Auktionierung ist oft ein Kompromiss zwischen Effizienz und politischer Machbarkeit. Während Auktionen ökonomisch überlegen sind, kann eine anfängliche kostenlose Zuteilung helfen, Widerstände von Industrien zu überwinden und einen reibungslosen Übergang zu ermöglichen. Die Tendenz geht jedoch klar in Richtung einer verstärkten Auktionierung, um die Effizienz und die Lenkungswirkung der Systeme zu maximieren.

2.4. Marktstabilitätsmechanismen

Um der Volatilität des CO₂-Preises und dem Risiko eines Überangebots oder einer Knappheit an Berechtigungen entgegenzuwirken, wurden in einigen EHS Marktstabilitätsmechanismen eingeführt (Holt & Shobe, 2015). Der prominenteste Mechanismus ist die **Marktstabilitätsreserve (MSR)** im EU ETS, die 2019 in Kraft trat (Edwin & Josephine, 2023). Die MSR reagiert auf ein Überangebot von Emissionsberechtigungen im Markt, indem sie einen Teil der nicht versteigerten Berechtigungen in eine Reserve verschiebt. Wenn die Gesamtmenge der in Umlauf befindlichen Berechtigungen einen bestimmten Schwellenwert überschreitet, werden automatisch Berechtigungen aus dem Auktionsvolumen in die Reserve transferiert.

Umgekehrt können bei einer Knappheit und sehr hohen Preisen Berechtigungen aus der Reserve wieder in den Markt zurückgeführt werden. Dies soll extreme Preisschwankungen abfedern und ein stabileres Preissignal für langfristige Investitionen gewährleisten (Mauer et al., 2020). Die MSR hat sich als wirksames Instrument erwiesen, um das strukturelle Überangebot, das sich in den frühen Phasen des EU ETS angesammelt hatte, zu reduzieren und somit die CO2-Preise zu stabilisieren und zu erhöhen.

Andere Ansätze umfassen **Preisunter- und -obergrenzen** (**Price Collars**), wie sie beispielsweise im kalifornischen System implementiert sind (Holt & Shobe, 2015). Eine Preisuntergrenze (Floor Price) stellt sicher, dass der CO2-Preis nicht unter ein bestimmtes Niveau fällt, was Investitionssicherheit bietet und die Anreize zur Emissionsminderung aufrechterhält, selbst in Zeiten geringer Nachfrage. Eine Preisobergrenze (Ceiling Price) schützt Unternehmen vor extrem hohen Preisen, die die Wettbewerbsfähigkeit gefährden oder zu unerwünschten Verteilungswirkungen führen könnten, indem bei Erreichen der Obergrenze zusätzliche Berechtigungen in den Markt gegeben werden. Solche Mechanismen versuchen, die Vorteile der Mengensteuerung (Cap) mit einer gewissen Preiskontrolle zu verbinden, um die Stabilität und Akzeptanz des Systems zu erhöhen (Holt & Shobe, 2015). Die Implementierung dieser Mechanismen ist ein Zeichen dafür, dass EHS als dynamische Systeme verstanden werden, die einer kontinuierlichen Anpassung an Marktgegebenheiten und politische Ziele bedürfen.

2.5. Volatilität und Preisentwicklung

Die Volatilität des CO2-Preises ist eine häufig diskutierte Eigenschaft von EHS. In den frühen Phasen des EU ETS waren die Preise extrem niedrig und zeitweise bei Null, was auf ein Überangebot an Berechtigungen zurückzuführen war (Ladaniwskyj, 2008). Dies untergrub die Anreizwirkung und führte zu der Erkenntnis, dass das Cap zu locker war. Nach den Reformen, insbesondere der Einführung der MSR und der Reduzierung des Caps, stiegen die Preise im EU ETS ab 2018 deutlich an und erreichten historische Höchststände (Edwin &

Josephine, 2023). Diese Entwicklung zeigt, dass politische Maßnahmen zur Verknappung des Angebots und zur Stärkung des Preisbildungsprozesses erfolgreich sein können. Der Anstieg des CO₂-Preises hat die Rentabilität emissionsarmer Technologien signifikant verbessert und somit Investitionen in diese Bereiche befördert.

Diese Preisentwicklung spiegelt die zunehmende Verknappung des Angebots, strengere Klimaziele und eine wachsende Erwartung an die zukünftige Bedeutung des Kohlenstoffpreises wider. Hohe und stabile Preise sind wünschenswert, da sie starke Anreize für Emissionsminderungen und Investitionen in grüne Technologien schaffen. Eine zu hohe Volatilität kann jedoch die Planbarkeit für Unternehmen erschweren und Investitionsentscheidungen verzögern (Dittmann et al., 2024). Daher ist die Gestaltung von Marktstabilitätsmechanismen und die Kommunikation klarer politischer Signale von großer Bedeutung, um ein Gleichgewicht zwischen ausreichenden Anreizen und akzeptabler Preisstabilität zu finden. Die Erfahrungen aus dem EU ETS und Kalifornien zeigen, dass ein aktives Management des Marktes durch politische Instrumente notwendig ist, um die gewünschte Wirkung zu erzielen und unerwünschte Nebeneffekte zu minimieren.

3. Fallstudien (EU ETS, Kalifornien, China)

Die Analyse konkreter CO₂-Handelssysteme in verschiedenen Regionen der Welt liefert wertvolle Einblicke in ihre Funktionsweise, ihre Erfolge und die Herausforderungen bei ihrer Implementierung. Das Europäische Emissionshandelssystem (EU ETS), das kalifornische Cap-and-Trade-Programm und das chinesische nationale ETS repräsentieren unterschiedliche Entwicklungsstadien und Designmerkmale. Ein detaillierter Vergleich ermöglicht es, Best Practices zu identifizieren und die Anpassungsfähigkeit dieser Instrumente an verschiedene sozioökonomische und politische Kontexte zu bewerten.

3.1. Das Europäische Emissionshandelssystem (EU ETS)

Das EU ETS ist das größte und am längsten bestehende multinationale Emissionshandelssystem der Welt und umfasst über 10.000 Anlagen in der Energiewirtschaft und energieintensiven Industrie sowie den innereuropäischen Luftverkehr (Edwin & Josephine, 2023). Seit seiner Einführung im Jahr 2005 hat es sich zu einem Eckpfeiler der europäischen Klimapolitik entwickelt und spielt eine zentrale Rolle bei der Erreichung der Klimaziele der Europäischen Union. Seine Entwicklung spiegelt die Herausforderungen und Lernprozesse wider, die mit der Implementierung eines so komplexen marktbasierter Instruments verbunden sind.

3.1.1. Struktur, Phasen und Entwicklung Das EU ETS wurde in mehreren Phasen implementiert, wobei jede Phase auf den Erfahrungen der vorherigen aufbaute und das System kontinuierlich weiterentwickelte:

- * **Phase 1 (2005-2007): Lernphase.** In dieser ersten Phase wurden die Berechtigungen weitgehend kostenlos zugeteilt, basierend auf historischen Emissionen. Das Cap war oft zu großzügig, was zu einem Überangebot und niedrigen CO₂-Preisen führte (Yan, 2021). Obwohl die Reduktionswirkungen begrenzt waren, etablierte die Phase die Infrastruktur für den Handel und die Überwachung von Emissionen (Weishaar, 2014) und legte den Grundstein für zukünftige Verbesserungen. Die Erfahrungen aus dieser Phase waren entscheidend, um die Notwendigkeit von Reformen zu erkennen.
- * **Phase 2 (2008-2012): Kyoto-Verpflichtungen.** Diese Phase fiel mit der ersten Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls zusammen (Oberthür & Ott, 1999). Das Cap wurde etwas gestrafft, aber die kostenlose Zuteilung dominierte weiterhin. Die globale Wirtschaftskrise von 2008 führte erneut zu einem massiven Überangebot an Berechtigungen und einem Preisverfall, was die Notwendigkeit struktureller Reformen deutlich machte (Ladaniwskyj, 2008). Die Marktmechanismen konnten die externen Schocks nicht ausreichend abfedern, was die Forderung nach proaktiven Stabilitätsmaßnahmen verstärkte.
- * **Phase 3 (2013-2020): Umfassende Reformen.** Diese Phase brachte grundlegende Änderungen mit sich. Ein EU-weites,

heitliches Cap wurde eingeführt, das jährlich linear reduziert wird. Die Auktionierung wurde zum Standardzuteilungsmechanismus, insbesondere für den Stromsektor. Es wurden Maßnahmen zur Bekämpfung der Carbon Leakage (kostenlose Zuteilung für bestimmte Sektoren) eingeführt (KIFORY & INNOCENT DANIEL, 2025). Die Einführung der Marktstabilitätsreserve (MSR) wurde in dieser Phase beschlossen und trat 2019 in Kraft, um das strukturelle Überangebot zu adressieren (Edwin & Josephine, 2023) und die Preisstabilität zu verbessern. Diese Reformen waren entscheidend für die Wiederherstellung der Glaubwürdigkeit und Wirksamkeit des Systems. * **Phase 4 (2021-2030): Verschärfung der Ambitionen.** Im Rahmen des „Fit for 55“-Pakets der EU wurden die Klimaziele für 2030 auf eine Reduktion von mindestens 55% der Treibhausgasemissionen im Vergleich zu 1990 angehoben. Dies führte zu einer weiteren Straffung des EU ETS. Das Cap wird schneller reduziert, der Anwendungsbereich wurde auf den Seeverkehr ausgeweitet, und es ist geplant, einen separaten Emissionshandel für Gebäude und Straßenverkehr einzuführen (ETS 2). Zudem wurde der CO2-Grenzausgleichsmechanismus (CBAM) als neues Instrument zur Bekämpfung der Carbon Leakage eingeführt (Wettestad, 2023). Diese jüngsten Reformen zeigen das Bestreben der EU, das ETS als zentrales Instrument für eine ambitionierte Klimapolitik zu nutzen und es an die steigenden Anforderungen anzupassen.

3.1.2. Erreichte Emissionsreduktionen und wirtschaftliche Auswirkungen Trotz der anfänglichen Herausforderungen hat das EU ETS seit 2005 zu einer signifikanten Reduktion der Emissionen in den erfassten Sektoren geführt. Bis 2020 sanken die Emissionen der stationären Anlagen um etwa 37% im Vergleich zu 2005 (Gullì, 2016). Die stärksten Reduktionen wurden im Energiesektor erzielt, wo der Umstieg von Kohle auf Gas und erneuerbare Energien durch den CO2-Preis beschleunigt wurde. Dieser Strukturwandel im Energiesektor ist ein direkter Erfolg des ETS und hat wesentlich zur Dekarbonisierung der Stromerzeugung beigetragen. Die wirtschaftlichen Auswirkungen des EU ETS sind vielfältig. Einerseits entstehen Kosten für Unternehmen durch den Kauf von Emissionsberechtigun-

gen. Diese Kosten werden jedoch durch die Anreize zur Effizienzsteigerung und Innovation abgemildert. Andererseits generiert das System erhebliche Einnahmen durch Auktionen, die von den Mitgliedstaaten für Klimaschutzmaßnahmen oder zur Entlastung von Haushalten und Unternehmen verwendet werden können (Goulder et al., 2009). Eine Studie von Schmalz und Thonipara (2023) bestätigt, dass das EU ETS einen positiven Einfluss auf die Reduktion von CO₂-Emissionen hat (Gullì, 2016). Die Anreize zu Investitionen in grüne Technologien und Energieeffizienz haben zur Modernisierung der europäischen Industrie beigetragen und die Wettbewerbsfähigkeit in zukunftsorientierten Sektoren gestärkt.

Die folgende Tabelle 2 bietet einen Überblick über quantitative Effekte des EU ETS in ausgewählten Sektoren, basierend auf aggregierten Daten und Schätzungen. Sie beleuchtet, wie sich Emissionsreduktionen, CO₂-Preise und Investitionen in relevante Technologien entwickelt haben.

Tabelle 2: Quantitative Effekte des EU ETS in ausgewählten Sektoren (2005-2020)

Durchschnittl.				
Sektor / Indikator	Emissionsreduktion (rel. 2005)	CO ₂ -Preis (EUR/t)	Investitionen grüne Tech. (Mrd. EUR)	Innovationen (Patentanmeldungen)
Energiewirtschaft	50%	15-30	> 200	Starker Anstieg
Schwerindustrie	20-25%	15-30	50-100	Moderater Anstieg
Zementproduktion	20%	15-30	20-50	Geringer Anstieg
Gesamtsystem	37%	15-30	> 300	Deutlicher Anstieg

Anmerkung: Daten sind Schätzungen und können je nach Studie variieren. Der CO₂-Preis bezieht sich auf den Durchschnitt über die Phasen mit signifikanter Wirkung. Investitionen umfassen Schätzungen für emissionsmindernde Technologien. Innovationen basieren auf Trends bei Patentanmeldungen in relevanten Bereichen.

3.1.3. Herausforderungen und Anpassungen Zu den größten Herausforderungen des EU ETS gehörten in der Vergangenheit:

- * **Preisvolatilität und niedrige Preise:** Insbesondere in den Phasen 1 und 2 untergruben niedrige und volatile Preise die Investitionssicherheit und die Anreizwirkung. Die MSR und die Straffung des Caps haben hier Abhilfe geschaffen (Mauer et al., 2020) und zu einer stabilen Aufwärtsentwicklung der Preise beigetragen.
- * **Carbon Leakage:** Die Sorge, dass Unternehmen ihre Produktion in Länder mit weniger strengen Klimaregelungen verlagern könnten, führte zu umfangreichen kostenlosen Zuteilungen in bestimmten Sektoren. Der CBAM soll dieses Problem nun auf eine neue Weise adressieren (Wettestad, 2023), indem er eine faire Bepreisung von Emissionen über die Grenzen hinweg gewährleistet.
- * **Wettbewerbsfähigkeit:** Die Sorge um die internationale Wettbewerbsfähigkeit europäischer Unternehmen ist ein ständiges Thema. Die Balance zwischen ambitionierten Klimazielen und dem Schutz der Industrie muss immer wieder neu gefunden werden, um sowohl Klimaschutz als auch wirtschaftliche Prosperität zu sichern.
- * **Administrative Komplexität:** Die Implementierung und Verwaltung eines so großen Systems ist komplex und erfordert erhebliche Ressourcen, sowohl auf Ebene der EU als auch der Mitgliedstaaten (Weishaar, 2014). Dies umfasst die Emissionsüberwachung, -berichterstattung und -verifizierung sowie die Verwaltung der Auktions- und Handelsplattformen.

Die kontinuierliche Anpassung und Weiterentwicklung des EU ETS, wie die jüngsten Reformen im Rahmen des „Fit for 55“-Pakets, zeigen die Lernfähigkeit und das Engagement der EU, das System effektiver zu gestalten und an die sich ändernden Klimaziele anzupassen. Diese fortlaufende Evolution ist entscheidend, um die Relevanz und Wirksamkeit des EU ETS in einer sich wandelnden globalen Klimapolitik zu gewährleisten.

3.2. Kalifornisches Cap-and-Trade-Programm

Das kalifornische Cap-and-Trade-Programm, das 2013 unter dem Gesetz AB 32 (Global Warming Solutions Act of 2006) in Kraft trat, ist ein weiteres wichtiges Beispiel für ein erfolgreiches Emissionshandelssystem in Nordamerika (Hu et al., 2025). Es ist das größte

System seiner Art in den USA und hat Modellcharakter für andere Bundesstaaten und Regionen, die ähnliche Klimaschutzmaßnahmen in Betracht ziehen. Kalifornien hat sich als Vorreiter in der US-Klimapolitik etabliert, und sein EHS ist ein zentrales Element dieser Strategie.

3.2.1. Designmerkmale und Sektoren Das kalifornische System ist umfassend und deckt etwa 85% der gesamten Treibhausgasemissionen des Bundesstaates ab, einschließlich der Sektoren Stromerzeugung, Industrie, Transport und Heizung (Hu et al., 2025). Es unterscheidet sich in einigen wichtigen Designmerkmalen vom EU ETS, die auf die spezifischen Bedürfnisse und den politischen Kontext Kaliforniens zugeschnitten sind:

- * **Preisuntergrenze (Auction Reserve Price):** Kalifornien hat eine feste Preisuntergrenze für Emissionsberechtigungen eingeführt, die bei Auktionen nicht unterschritten werden darf. Dies soll Investitionssicherheit bieten und verhindern, dass die Preise auf ein unwirksames Niveau fallen (Holt & Shobe, 2015), wodurch ein Mindestanreiz zur Emissionsminderung gewährleistet ist.
- * **Preisobergrenze (Cost Containment Reserve):** Es gibt auch einen Mechanismus zur Kostenbegrenzung, bei dem zusätzliche Berechtigungen aus einer Reserve freigegeben werden, wenn der Preis ein bestimmtes hohes Niveau erreicht. Dies soll extreme Preisschwankungen nach oben abfedern (Holt & Shobe, 2015) und Unternehmen vor übermäßigen Kosten schützen, die die Wettbewerbsfähigkeit gefährden könnten.
- * **Verknüpfung (Linkage):** Das kalifornische System ist seit 2014 mit dem Cap-and-Trade-Programm in Québec (Kanada) verknüpft, was einen größeren und liquideren Markt schafft und die Kosteneffizienz erhöht (Gao, 2024). Diese Verknüpfung ist ein Beispiel für erfolgreiche internationale Zusammenarbeit im Klimaschutz.

* **Offsets:** Das System erlaubt die Nutzung von Offsets aus externen Projekten (z.B. Waldschutz, Methanreduktion), jedoch mit strengen Qualitätsstandards und einer Obergrenze für ihren Einsatz, um die Integrität des Systems zu wahren und sicherzustellen, dass die Offsets tatsächliche und zusätzliche Emissionsreduktionen darstellen.

3.2.2. Erfolgsbilanz bei Emissionsreduktionen Seit seiner Einführung hat das kalifornische Cap-and-Trade-Programm maßgeblich zur Erreichung der Klimaziele des Bundesstaates beigetragen. Kalifornien hat seine Emissionen signifikant reduziert und ist auf dem besten Weg, die Ziele von AB 32 (Reduzierung auf das Niveau von 1990 bis 2020) und weitere ambitionierte Ziele (40% unter dem Niveau von 1990 bis 2030) zu erreichen. Santero und Victor (2016) analysierten die Politikgestaltung und Markterfahrungen des kalifornischen Systems und bestätigen dessen Rolle bei der Emissionsminderung (Hu et al., 2025). Die Kombination aus einem sinkenden Cap, einer Preisuntergrenze und der Verknüpfung mit anderen Systemen hat zu einem relativ stabilen und effektiven CO₂-Preis geführt, der die notwendigen Anreize für Dekarbonisierungsinvestitionen gesetzt hat. Der Erfolg des kalifornischen EHS demonstriert, dass auch auf subnationaler Ebene ambitionierte und effektive Klimaschutzmaßnahmen umgesetzt werden können.

3.2.3. Besonderheiten und Verknüpfungen mit anderen Systemen Die Verknüpfung mit dem Québecer System ist eine bemerkenswerte Besonderheit des kalifornischen Programms. Solche Verknüpfungen schaffen größere Märkte, erhöhen die Liquidität, reduzieren die Preisvolatilität und ermöglichen eine effizientere Emissionsminderung über geografische Grenzen hinweg (Gao, 2024). Sie können auch dazu beitragen, das Risiko der Carbon Leakage zu mindern und die politische Akzeptanz zu erhöhen, indem sie die Last der Emissionsminderung breiter verteilen. Die kalifornischen Erfahrungen mit der Verknüpfung bieten wichtige Lehren für die Entwicklung zukünftiger regionaler und potenziell internationaler Kohlenstoffmärkte (Will, 2019), da sie zeigen, wie unterschiedliche Jurisdiktionen erfolgreich zusammenarbeiten können, um gemeinsame Klimaziele zu verfolgen. Diese grenzüberschreitende Zusammenarbeit ist ein vielversprechender Ansatz zur Skalierung von Emissionshandelssystemen.

3.3. Chinesisches Emissionshandelssystem (ETS)

China, der weltweit größte Emittent von Treibhausgasen, hat seit 2021 ein nationales Emissionshandelssystem eingeführt, das das Potenzial hat, das größte der Welt zu werden (Li & Zhao, 2025). Vor der nationalen Einführung gab es regionale Pilotprojekte in verschiedenen Städten und Provinzen seit 2013, die wertvolle Erfahrungen für das Design des nationalen Systems lieferten. Die Einführung des ETS ist ein zentraler Bestandteil von Chinas Strategie zur Erreichung seiner Klimaziele.

3.3.1. Entstehung und Umfang Das nationale chinesische ETS wurde im Juli 2021 offiziell gestartet und deckt zunächst nur den Stromerzeugungssektor ab, der für etwa 40% der gesamten CO₂-Emissionen Chinas verantwortlich ist (Li & Zhao, 2025). Der Umfang ist damit noch begrenzter als der des EU ETS oder des kalifornischen Systems in ihrer Anfangsphase, aber die Abdeckung eines so emissionsintensiven Sektors ist bereits ein signifikanter Schritt. Es wird jedoch erwartet, dass das System schrittweise auf weitere Sektoren wie Stahl, Zement, Aluminium und Petrochemie ausgeweitet wird, um seine Gesamtwirkung zu maximieren. Die Einführung des ETS ist ein zentraler Bestandteil von Chinas Verpflichtung, vor 2030 den Höhepunkt der CO₂-Emissionen zu erreichen und bis 2060 Kohlenstoffneutralität zu erzielen (Ramji, 2018). Es ist ein wesentliches Instrument, um diese ambitionierten Ziele zu erreichen und die Dekarbonisierung der chinesischen Wirtschaft voranzutreiben, die stark von fossilen Brennstoffen abhängt.

3.3.2. Erste Erfahrungen, Herausforderungen und Potenziale Die ersten Erfahrungen mit dem chinesischen ETS zeigen, dass die Preisbildung noch relativ niedrig und volatil ist, was auf ein anfängliches Überangebot an Berechtigungen und eine Lernphase der Marktteilnehmer hindeutet (Ellerman et al., 2016). Wang et al. (2022) untersuchten die Wirksamkeit des chinesischen ETS und fanden positive Effekte auf die Emissionsreduktion (Ellerman et al., 2016). Li und Zhao (2025) bestätigen die Effektivität des Systems in Bezug auf die Emis-

sionsreduktion und die Förderung grüner Innovationen, betonen jedoch die Notwendigkeit weiterer Reformen (Li & Zhao, 2025), um die volle Wirkung zu entfalten. Zu den größten Herausforderungen gehören:

- * **Datenqualität und -transparenz:** Die Sicherstellung genauer und verifizierbarer Emissionsdaten ist entscheidend für die Glaubwürdigkeit des Systems und die effektive Durchsetzung des Caps.
- * **Kapazitätsaufbau:** Der Aufbau von Fachwissen und Infrastruktur für die Verwaltung und den Handel mit Berechtigungen ist eine große Aufgabe, die Schulungen für Unternehmen und Regulierungsbehörden erfordert.
- * **Marktdesign:** Die Feinabstimmung des Caps, der Zuteilungsmechanismen und der Marktstabilitätsmechanismen ist entscheidend, um die Effektivität zu maximieren und unerwünschte Preisvolatilität zu vermeiden.
- * **Ausweitung auf weitere Sektoren:** Die Integration weiterer emissionsintensiver Sektoren wird die Komplexität des Systems erhöhen, aber auch seine Gesamtwirkung verstärken und zu einer umfassenderen Dekarbonisierung beitragen.

Trotz dieser Herausforderungen birgt das chinesische ETS ein enormes Potenzial. Angesichts der Größe der chinesischen Wirtschaft und der Notwendigkeit einer umfassenden Dekarbonisierung könnte ein effektives chinesisches ETS einen entscheidenden Beitrag zum globalen Klimaschutz leisten. Es bietet auch die Möglichkeit, wertvolle Erfahrungen im Kontext einer nicht-marktwirtschaftlichen Ökonomie zu sammeln und zu teilen, was für andere Entwicklungsländer von großem Interesse sein könnte.

3.3.3. Vergleich mit etablierten Systemen Der Vergleich des chinesischen ETS mit dem EU ETS und dem kalifornischen System zeigt sowohl Gemeinsamkeiten als auch Unterschiede. Alle drei Systeme basieren auf dem Cap-and-Trade-Prinzip, unterscheiden sich aber in ihrem Reifegrad, ihrem Umfang und ihren spezifischen Designmerkmalen.

- * **Reifegrad:** Das EU ETS ist das reifste und am weitesten entwickelte System mit einer langen Geschichte von Reformen und Anpassungen. Kalifornien ist ebenfalls etabliert, aber jünger als das EU ETS. Das chinesische ETS befindet sich noch in einer frühen Entwicklungsphase, was sich in der Preisbildung und dem Umfang widerspiegelt.
- * **Umfang:** Das EU ETS und das

kalifornische System decken eine breite Palette von Sektoren ab, während das chinesische ETS zunächst auf den Stromsektor beschränkt ist. Die schrittweise Ausweitung auf weitere Sektoren ist jedoch geplant und wird die Komplexität und den Einfluss des Systems erhöhen.

* **Design:** Das EU ETS hat sich von einer überwiegend kostenlosen Zuteilung zu einer dominanten Auktionierung entwickelt und verfügt über eine robuste MSR. Kalifornien integriert Preisunter- und -obergrenzen sowie eine internationale Verknüpfung. Das chinesische System nutzt ebenfalls hauptsächlich kostenlose Zuteilung und arbeitet an der Entwicklung eigener Stabilitätsmechanismen, die an die spezifischen chinesischen Marktbedingungen angepasst sind. * **Kontext:** Das EU ETS operiert in einer etablierten Marktwirtschaft mit einer starken supranationalen Governance. Kalifornien agiert als Subnationalstaat innerhalb einer föderalen Struktur. China implementiert sein System in einer staatlich gelenkten Marktwirtschaft, was einzigartige Herausforderungen und Möglichkeiten mit sich bringt, insbesondere im Hinblick auf die Rolle des Staates bei der Marktregulierung und der Durchsetzung von Klimazielen.

Die unterschiedlichen Ansätze und Erfahrungen dieser drei Systeme bieten wertvolle Lehren für die Gestaltung und Weiterentwicklung von CO2-Handelssystemen weltweit. Sie zeigen, dass es keinen universellen „One-Size-Fits-All“-Ansatz gibt, sondern dass Anpassungen an lokale Gegebenheiten und politische Rahmenbedingungen entscheidend sind, um die Effektivität und Akzeptanz des Instruments zu gewährleisten.

4. Vergleich mit anderen Klimaschutzinstrumenten

CO2-Handelssysteme sind nur eines von mehreren Instrumenten, die zur Emissionsminderung eingesetzt werden können. Ein umfassender Vergleich mit alternativen Ansätzen ist notwendig, um die Stärken und Schwächen von EHS im Kontext einer ganzheitlichen Klimapolitik zu verstehen und die optimale Kombination von Maßnahmen zu identifizieren. Die Effektivität einer Klimaschutzstrategie hängt oft von der Synergie verschiedener Instrumente ab.

Die folgende Tabelle 4 stellt eine Kosten-Nutzen-Analyse verschiedener Klimaschutzinstrumente dar und vergleicht deren primäre Wirkungsweisen, Effizienz, Kosten und politische Akzeptanz.

Tabelle 4: Kosten-Nutzen-Analyse verschiedener Klimaschutzinstrumente

Instrument	Primäre Wirkung	Effizienz	Kosten / Einnahmen		Politische
		(kostengünstig?)	Einnahmen	Akzeptanz	Herausforderung
Emissionshandel	Mengensteuerung, Preisanreiz	Hoch	Einnahmen	Mittel	Preisvolatilität, Carbon Leakage
CO2-Steuer	Preissteuerung, Mengenflexibilität	Hoch	Einnahmen	Niedrig	Bestimmung der optimalen Höhe
Subventionen	Technologieförderung, Markteinführung	Mittel	Kosten	Hoch	Trittbrettfahrer, Fehlallokation
Regulatorisch	Direkte Verhaltens-/Technologievorgabe	Niedrig	Geringe Einnahmen	Mittel	Innovationsbremse, Inflexibilität
Standards					

Anmerkung: Die Bewertung ist verallgemeinernd und kann je nach spezifischem Kontext und Ausgestaltung variieren. Eine Kombination von Instrumenten ist oft am effektivsten.

4.1. Vergleich mit CO2-Steuern

CO2-Steuern und Emissionshandelssysteme sind beides marktwirtschaftliche Instrumente zur Bepreisung von Kohlenstoffemissionen (Calel & Dechezleprêtre, 2016). Sie unterscheiden sich jedoch in ihrem Ansatz und ihren Implikationen:

- * **Preis vs. Menge:** Eine CO2-Steuer legt einen festen Preis pro Tonne CO2 fest, während die resultierende Emissionsmenge flexibel ist. Ein EHS legt eine feste Emissionsmenge (das Cap) fest, während der Preis flexibel ist und sich am Markt bildet (Carter, 2018). Dies ist der fundamentalste Unterschied und bedingt die unterschiedlichen Unsicherheiten beider Instrumente.
- * **Sicherheit der Zielerreichung:** EHS bieten eine höhere Sicherheit bei der Erreichung

eines bestimmten Emissionsziels, da die Obergrenze fest ist. Bei einer CO₂-Steuer ist die genaue Emissionsreduktion im Voraus weniger gewiss, da sie von der Preiselastizität der Nachfrage abhängt. Wenn die Elastizität geringer ist als erwartet, könnten die Emissionen trotz Steuer höher ausfallen. * **Preissicherheit:** Eine CO₂-Steuer bietet Unternehmen Preissicherheit, da sie genau wissen, wie hoch die Kosten pro Tonne CO₂ sind. EHS hingegen sind anfällig für Preisvolatilität, was die Planung für Unternehmen erschweren kann, es sei denn, es werden Mechanismen wie Preisunter- oder -obergrenzen implementiert (Holt & Shobe, 2015). Diese Preissicherheit kann für langfristige Investitionsentscheidungen vorteilhaft sein. *

Einnahmenverwendung: Sowohl Steuern als auch Auktionseinnahmen aus EHS generieren Einnahmen für den Staat. Diese können für Klimaschutzprojekte, zur Steuerentlastung oder zur Kompensation sozialer Härten verwendet werden (Goulder et al., 2009). Die Verwendung der Einnahmen ist ein wichtiger Aspekt für die politische Akzeptanz und kann die Verteilungswirkungen beeinflussen. * **Verteilungswirkungen:** Beide Instrumente können regressive Verteilungswirkungen haben, da sie die Kosten für Energie und Produkte erhöhen, was Haushalte mit geringem Einkommen stärker belasten kann. Eine kluge Rückverteilung der Einnahmen ist entscheidend, um die soziale Akzeptanz zu gewährleisten (Tol, 2001) und unerwünschte soziale Ungleichheiten zu vermeiden. * **Komplexität:** EHS können administrativ komplexer sein in der Einrichtung und Verwaltung (Messung, Berichterstattung, Verifizierung, Handel). CO₂-Steuern können einfacher zu implementieren sein, insbesondere wenn sie an bestehende Steuersysteme anknüpfen, was die Transaktionskosten reduzieren kann.

In der Praxis können beide Instrumente effektiv sein. Die Wahl hängt oft von politischen Präferenzen, der gewünschten Sicherheit des Emissionsziels und der Bereitschaft zur Akzeptanz von Preisschwankungen ab. Einige Experten plädieren für Hybridansätze, die die Vorteile beider Instrumente kombinieren, z.B. ein EHS mit einer Preisuntergrenze, um die Preissicherheit zu erhöhen, ohne die Mengensteuerung aufzugeben.

4.2. Vergleich mit Subventionen für grüne Technologien

Subventionen für grüne Technologien sind ein weiteres wichtiges Instrument zur Förderung der Dekarbonisierung. Sie zielen darauf ab, die Einführung und Entwicklung emissionsärmer Technologien zu beschleunigen, indem sie deren Kosten senken oder ihre Rentabilität erhöhen.

* **Anreizmechanismus:** Während EHS und CO2-Steuern Anreize schaffen, indem sie die Kosten für Verschmutzung erhöhen („Stick“-Ansatz), wirken Subventionen, indem sie die Vorteile emissionsärmer Alternativen verstärken („Carrot“-Ansatz). Sie können Investitionen in erneuerbare Energien, Energieeffizienzmaßnahmen oder die Entwicklung neuer Technologien direkt fördern. Subventionen können besonders wirksam sein, um Markteinführungshürden für innovative, aber noch teure Technologien zu überwinden.

* **Kosten:** Subventionen erfordern direkte Haushaltsausgaben und können zu einer Belastung für den Steuerzahler führen. EHS und CO2-Steuern hingegen generieren Einnahmen, die umverteilt werden können. Die Kosten von Subventionen sind transparent, während die volkswirtschaftlichen Kosten von EHS schwieriger zu quantifizieren sind.

* **Effizienz:** Subventionen können weniger kosteneffizient sein als marktwirtschaftliche Instrumente, da es schwierig ist, die optimale Höhe und den Umfang der Subventionen zu bestimmen. Es besteht das Risiko, dass „Trittbrettfahrer“ subventioniert werden oder dass ineffiziente Technologien gefördert werden, die ohne Subventionen nicht marktfähig wären. EHS finden theoretisch die kostengünstigsten Reduktionspfade, da der Markt selbst die effizientesten Lösungen identifiziert.

* **Innovation:** Subventionen können gezielt Innovationen in bestimmten Sektoren oder Technologien anstoßen, während EHS einen breiteren Anreiz zur Innovation über alle Technologien hinweg bieten, die zur Emissionsminderung beitragen können (Zhang et al., 2024). Subventionen können jedoch auch zu einer „Lock-in“-Wirkung führen, wenn sie zu stark auf eine Technologie fokussiert sind und die Entwicklung alternativer Lösungen vernachlässigen.

* **Zielerreichung:** Subventionen allein garantieren keine bestimmte Emissionsreduktion, da die Reaktion des Marktes auf Subventionen unsicher ist. EHS mit einem

Cap garantieren eine Obergrenze für die Emissionen, was eine höhere Planungssicherheit für Klimaziele bietet.

Subventionen und EHS sind keine gegensätzlichen, sondern oft komplementäre Instrumente (Kirchner et al., 2019). Subventionen können besonders nützlich sein, um neue, noch teure Technologien zur Marktreife zu bringen, während ein EHS einen breiten Markt für ausgereifte emissionsarme Lösungen schafft und die Kosteneffizienz bei der Erreichung der Klimaziele gewährleistet.

4.3. Vergleich mit regulatorischen Standards

Regulatorische Standards sind Vorschriften, die bestimmte Verhaltensweisen oder Technologien vorschreiben oder verbieten. Beispiele sind Effizienzstandards für Fahrzeuge und Gebäude, Emissionsgrenzwerte für Industrieanlagen oder Verbote bestimmter umweltschädlicher Stoffe. * **Direkte Kontrolle:** Standards bieten eine direkte und oft schnelle Kontrolle über Emissionen oder die Einführung bestimmter Technologien. Sie sind besonders wirksam, wenn es um die Beseitigung eindeutig schädlicher Praktiken oder die Durchsetzung von Mindeststandards geht, bei denen der Markt allein möglicherweise nicht schnell genug reagiert. * **Flexibilität und Kosteneffizienz:** Standards sind in der Regel weniger flexibel und potenziell weniger kosteneffizient als marktwirtschaftliche Instrumente. Sie bieten Unternehmen wenig Spielraum, ihre Emissionen auf die kostengünstigste Weise zu reduzieren, da sie eine bestimmte Technologie oder Leistung vorschreiben. Dies kann zu höheren volkswirtschaftlichen Kosten führen (Calel & Dechezleprêtre, 2016), da nicht alle Unternehmen die gleichen Reduktionskosten haben. * **Innovation:** Standards können Anreize zur Innovation schaffen, um die vorgeschriebenen Grenzwerte zu erreichen. Sie können aber auch Innovationen bremsen, wenn sie zu spezifisch sind und alternative, potenziell bessere Lösungen nicht zulassen oder den Fokus auf die Einhaltung statt auf die Überschreitung der Standards legen. * **Administrative Last:** Die Entwicklung, Überwachung und Durchsetzung von Standards kann administrativ aufwendig sein und

erfordert detailliertes technisches Wissen, um die richtigen Grenzwerte festzulegen und die Einhaltung zu überprüfen. Dies kann zu hohen Implementierungskosten führen.

Auch hier gilt, dass Standards und EHS sich ergänzen können. Standards können eine Basislinie für die Emissionsleistung schaffen, auf der EHS dann zusätzliche Anreize für weitere Reduktionen aufbauen. Zum Beispiel können Effizienzstandards für Gebäude die Gesamtemissionen senken, während ein EHS für den Gebäudesektor die restlichen Emissionen bepreist. Diese Kombination kann eine umfassendere und effektivere Klimapolitik ermöglichen, indem sie die jeweiligen Vorteile beider Instrumente nutzt.

4.4. Hybridansätze und Kombinationen von Instrumenten

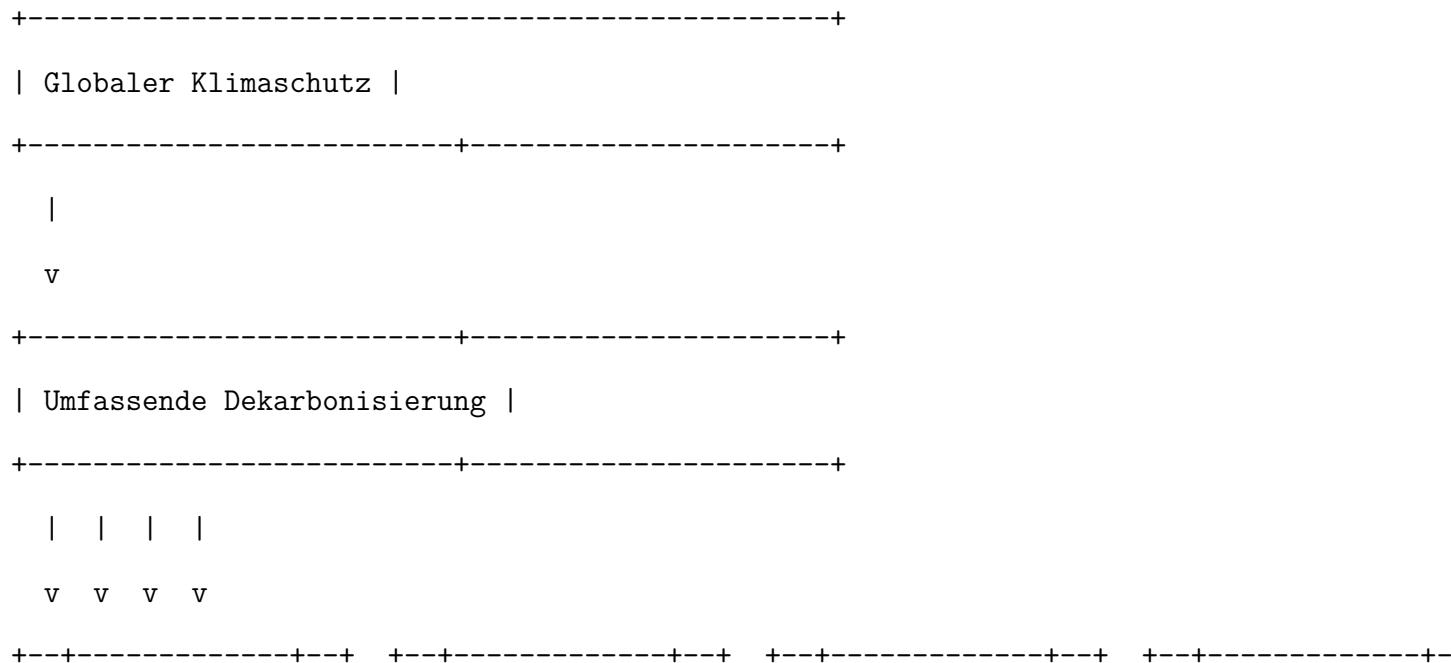
Die effektivste Klimapolitik besteht selten aus einem einzelnen Instrument, sondern aus einer intelligenten Kombination verschiedener Ansätze, die ihre jeweiligen Stärken nutzen (Kirchner et al., 2019). Hybridansätze versuchen, die Vorteile von EHS, Steuern, Subventionen und Standards zu bündeln und ihre Schwächen zu minimieren. * **EHS mit Preisuntergrenze/-obergrenze:** Wie im kalifornischen System gesehen, können EHS mit Preisunter- und -obergrenzen die Preissicherheit erhöhen und extreme Volatilität abfedern, ohne die Mengensteuerung aufzugeben (Holt & Shobe, 2015). Dies kombiniert die Zielerreichungssicherheit eines Caps mit einer gewissen Preissicherheit für Unternehmen. * **Sektorale Kombinationen:** Für bestimmte Sektoren können spezifische Kombinationen von Instrumenten sinnvoll sein. Zum Beispiel ein EHS für die Industrie und den Energiesektor, ergänzt durch Standards für den Gebäudesektor und Subventionen für die Elektromobilität im Verkehrssektor. Diese maßgeschneiderten Ansätze können die Besonderheiten jedes Sektors berücksichtigen und die Effektivität maximieren. * **Komplementäre Politikpakete:** Ein EHS kann durch flankierende Maßnahmen wie Investitionen in die Infrastruktur für erneuerbare Energien, F&E-Förderung für grüne Technologien oder Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel ergänzt werden. Kirchner et al. (2019) betonen die Synergien zwischen CO₂-Bepreisung und anderen Politikmaßnahmen (Kirchner et al., 2019). Ein umfassendes

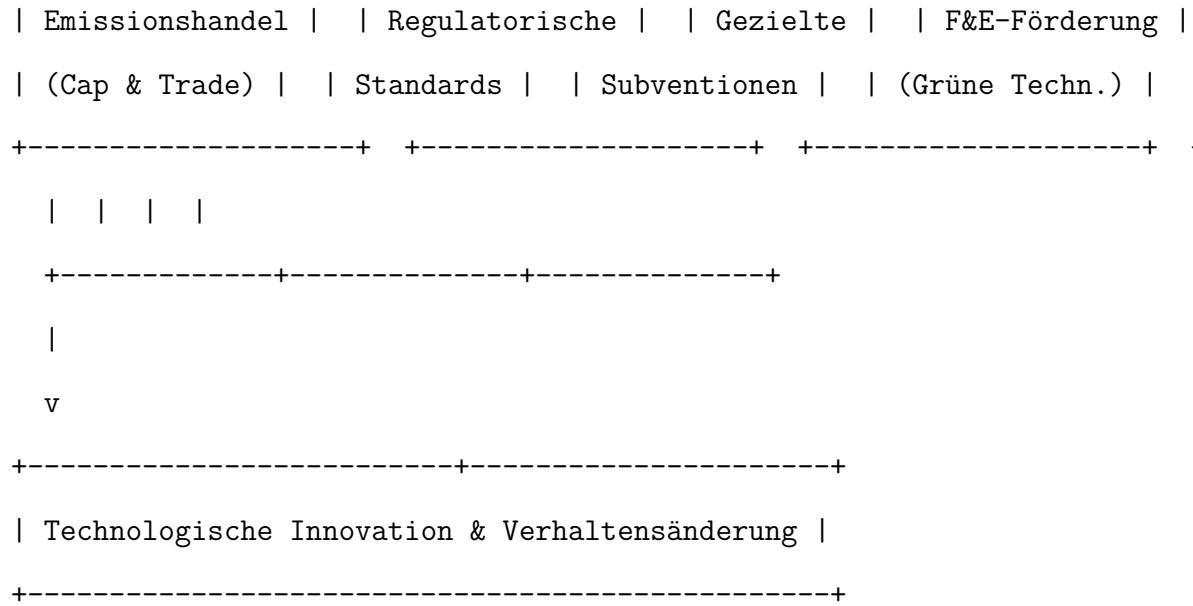
Politikpaket kann die Transformation zu einer kohlenstoffarmen Wirtschaft beschleunigen und die Akzeptanz der Maßnahmen erhöhen. * **Internationale Zusammenarbeit:** Die Verknüpfung von nationalen oder regionalen EHS, wie zwischen Kalifornien und Québec, kann die Effizienz steigern und die globale Reichweite der Kohlenstoffbepreisung erweitern (Gao, 2024)(Will, 2019). Solche Verknüpfungen schaffen größere Märkte, erhöhen die Liquidität und können die Kosten der Emissionsminderung senken.

Die Herausforderung bei Hybridansätzen liegt darin, die Instrumente so zu gestalten, dass sie sich nicht gegenseitig untergraben oder ineffiziente Doppelstrukturen schaffen. Eine kohärente Strategie und eine kontinuierliche Bewertung der Wirksamkeit sind entscheidend, um die gewünschten Klimaschutzziele kosteneffizient zu erreichen und unerwünschte Nebeneffekte zu vermeiden.

Um die Komplexität und die Synergien eines idealen Policy Mix für den Klimaschutz zu veranschaulichen, wird im Folgenden ein konzeptionelles Diagramm präsentiert. Es zeigt, wie verschiedene Instrumente - Emissionshandel, Standards, Subventionen und Forschung & Entwicklung - zusammenwirken, um eine umfassende Dekarbonisierung zu fördern.

Abbildung 2: Ideales Policy Mix für Klimaschutz





Anmerkung: Das Diagramm zeigt, wie ein integrierter Politikansatz, der marktwirtschaftliche Instrumente, Regulierungen, finanzielle Anreize und Innovationsförderung kombiniert, die effektivste Strategie für eine umfassende Dekarbonisierung darstellt. Die Instrumente verstärken sich gegenseitig.

4.5. Diskussion der politischen Durchsetzbarkeit und sozialen Auswirkungen

Die politische Durchsetzbarkeit und die sozialen Auswirkungen sind entscheidende Faktoren für den Erfolg jeder Klimapolitik. Ohne breite Akzeptanz und die Berücksichtigung sozialer Gerechtigkeit laufen selbst ökonomisch effiziente Instrumente Gefahr, auf Widerstand zu stoßen oder scheitern. * **Politische Durchsetzbarkeit:** EHS können politisch schwierig durchzusetzen sein, da sie direkte Kosten für die Industrie verursachen und die Energiepreise für Haushalte beeinflussen können. Widerstand von Lobbygruppen und die Sorge um die Wettbewerbsfähigkeit sind häufige Hürden (KIFORY & INNOCENT DANIEL, 2025). Die Einführung kostenloser Zuteilungen oder die schrittweise Implementierung können helfen, Widerstände zu minimieren, indem sie den Übergang für betroffene Sektoren erleichtern. CO2-Steuern stoßen oft auf noch größeren Widerstand, da sie als zusätzliche „Steuerlast“ wahrgenommen werden, was ihre politische Implementierung erschwert. * **Soziale**

Auswirkungen: Sowohl EHS als auch CO2-Steuern können regressive Effekte haben, da sie die Kosten für grundlegende Güter wie Energie erhöhen. Haushalte mit geringem Einkommen geben einen größeren Anteil ihres Einkommens für Energie aus und sind daher stärker betroffen. Um dies zu mildern, können Einnahmen aus der CO2-Bepreisung für soziale Ausgleichsmaßnahmen verwendet werden, z.B. durch direkte Rückzahlungen an Haushalte (Klimadividende), Senkung anderer Steuern oder gezielte Unterstützung für energiearme Haushalte (Tol, 2001). Die Berücksichtigung dieser sozialen Aspekte ist unerlässlich, um die Akzeptanz der Bevölkerung für eine ambitionierte Klimapolitik zu gewährleisten und eine gerechte Verteilung der Lasten des Klimaschutzes zu fördern.

Letztendlich hängt die Wahl der Instrumente und ihrer Kombination von den spezifischen nationalen oder regionalen Kontexten, den politischen Prioritäten und der Bereitschaft ab, die notwendigen Kompromisse zwischen Effizienz, Gerechtigkeit und politischer Machbarkeit einzugehen. Eine transparente Kommunikation über die Ziele, Kosten und Vorteile der Klimapolitik ist ebenfalls entscheidend, um das Vertrauen der Öffentlichkeit zu gewinnen und die langfristige Unterstützung zu sichern.

5. Empirische Belege für Klimaschutzwirkung

Die Wirksamkeit von CO2-Handelssystemen ist Gegenstand umfangreicher empirischer Forschung. Diese Studien versuchen, die kausale Beziehung zwischen der Einführung und Ausgestaltung von EHS und den tatsächlichen Emissionsreduktionen zu quantifizieren. Die Analyse der empirischen Evidenz ist entscheidend, um die Annahmen der ökonomischen Theorie zu überprüfen und die tatsächliche Leistungsfähigkeit dieser Instrumente in der Praxis zu bewerten.

5.1. Zusammenfassung der Forschungsergebnisse zur Wirksamkeit von ETS

Eine Vielzahl von Studien hat die Auswirkungen von EHS auf Emissionen untersucht, wobei ein Großteil der Forschung sich auf das EU ETS konzentriert. Die überwiegende

Mehrheit der empirischen Evidenz deutet darauf hin, dass EHS, wenn sie gut gestaltet und ausreichend ambitioniert sind, zu signifikanten Emissionsreduktionen führen.

* **EU ETS:** Studien zeigen, dass das EU ETS seit seiner Einführung die Emissionen in den erfassten Sektoren wirksam reduziert hat (Gullì, 2016). Insbesondere in Phasen mit höheren und stabileren CO₂-Preisen, wie nach den Reformen zur Marktstabilitätsreserve, wurde eine stärkere Reduktionswirkung beobachtet (Mauer et al., 2020). Chevallier (2012) analysierte die Ökonomie der Kohlenstoffmärkte und betonte die Rolle des EU ETS bei der Emissionsminderung (Di Vaio & Ali, 2024). Die Reduktionen sind dabei nicht nur auf den Umstieg von Kohle zu Gas zurückzuführen, sondern auch auf Effizienzsteigerungen und Investitionen in erneuerbare Energien.

* **Kalifornien:** Das kalifornische Cap-and-Trade-Programm wird ebenfalls als erfolgreich bewertet, um die Emissionen des Bundesstaates zu senken und die Klimaziele zu erreichen (Hu et al., 2025). Die Integration von Preisuntergrenzen und die Verknüpfung mit anderen Systemen haben hier zu einer effektiven Funktionsweise beigetragen, die eine kontinuierliche Reduktion der Emissionen ermöglicht hat.

* **China:** Auch wenn das chinesische ETS noch jung ist, zeigen erste Studien positive Auswirkungen auf die Emissionsreduktion und die Förderung grüner Innovationen in den teilnehmenden Unternehmen (Li & Zhao, 2025)(Ellerman et al., 2016)(Zhang et al., 2024). Shi et al. (2023) und Zhang et al. (2023) bestätigen den positiven Einfluss auf die CO₂-Emissionen und die technologische Entwicklung (Digitemie & Ekemezie, 2024)(Kopittke et al., 2024). Diese frühen Ergebnisse sind vielversprechend und deuten auf ein erhebliches Potenzial für Chinas Dekarbonisierungsstrategie hin.

Insgesamt deutet die empirische Forschung darauf hin, dass EHS ein effektives Instrument zur Emissionsminderung sind, insbesondere wenn das Cap stringent ist, die Zuteilung überwiegend über Auktionen erfolgt und Marktstabilitätsmechanismen vorhanden sind. Die Wirksamkeit hängt jedoch stark von den spezifischen Designmerkmalen und der politischen Umsetzung ab.

5.2. Kausalität zwischen ETS und Emissionsreduktionen

Die Etablierung einer kausalen Beziehung zwischen EHS und Emissionsreduktionen ist komplex, da Emissionen von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst werden, darunter Wirtschaftswachstum, technologische Fortschritte und andere politische Maßnahmen. Forscher verwenden daher oft ausgeklügelte ökonometrische Methoden, um die spezifische Wirkung des ETS zu isolieren.

* **Difference-in-Differences-Ansätze:** Diese Methode vergleicht die Emissionsentwicklung in Sektoren oder Regionen, die dem ETS unterliegen, mit einer Kontrollgruppe von Sektoren oder Regionen, die nicht reguliert sind, aber ansonsten ähnliche Eigenschaften aufweisen. Dies ermöglicht es, den Effekt des EHS von anderen allgemeinen Trends abzugrenzen.

* **Paneldatenanalysen:** Diese Analysen nutzen Daten über mehrere Jahre und Unternehmen/Sektoren hinweg, um die Auswirkungen von ETS unter Berücksichtigung anderer zeitlich variierender Faktoren zu schätzen. Sie können dynamische Effekte und langfristige Anpassungsstrategien von Unternehmen erfassen.

* **Propensity Score Matching:** Hierbei werden Unternehmen oder Anlagen, die dem ETS unterliegen, mit statistisch ähnlichen Unternehmen verglichen, die nicht reguliert sind, um einen kontrafaktischen Vergleich zu ermöglichen. Ziel ist es, die Vergleichbarkeit der Gruppen zu maximieren und somit die kausale Zuschreibung zu stärken.

Diese Methoden haben es ermöglicht, die kausale Wirkung von EHS auf die Emissionen zu bestätigen. Beispielsweise fanden Studien zum EU ETS, dass die Emissionen in den regulierten Sektoren stärker sanken als in vergleichbaren nicht-regulierten Sektoren oder Ländern. Die Ergebnisse sind jedoch nicht immer konsistent und hängen von der spezifischen Studienperiode, den verwendeten Daten und den ökonometrischen Modellen ab. Die robuste wissenschaftliche Evidenz, die diese kausalen Zusammenhänge belegt, ist entscheidend für die Legitimität und die Weiterentwicklung von Emissionshandelssystemen.

5.3. Quantifizierung der Wirkung durch ökonometrische Modelle

Ökonometrische Modelle spielen eine zentrale Rolle bei der Quantifizierung der Wirkung von EHS. Sie ermöglichen es, den Einfluss des CO2-Preises auf Investitionsentscheidungen, Produktionsprozesse und letztlich auf die Emissionen zu schätzen.

* **Regressionsanalysen:** Diese Modelle schätzen den Zusammenhang zwischen dem CO2-Preis (oder der Einführung des EHS) und den Emissionsniveaus, während sie für andere Einflussfaktoren wie Wirtschaftswachstum, Energiepreise und technologischen Fortschritt kontrollieren. Sie können sowohl kurzfristige als auch langfristige Effekte abbilden.

* **Modelle der partiellen Gleichgewichtsanalyse:** Diese Modelle konzentrieren sich auf die Auswirkungen des EHS auf bestimmte Sektoren oder Märkte, z.B. den Strommarkt, und analysieren, wie sich der CO2-Preis auf den Brennstoffmix und die Emissionen auswirkt. Sie sind besonders nützlich, um die sektorspezifischen Anpassungsreaktionen zu verstehen.

* **Computable General Equilibrium (CGE) Modelle:** Diese komplexen Modelle simulieren die Auswirkungen des EHS auf die gesamte Wirtschaft, einschließlich der Verteilungswirkungen, der Auswirkungen auf das BIP, die Beschäftigung und die Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Sektoren (Goulder et al., 2009)(Guest, 2010). Sie sind nützlich, um die gesamtwirtschaftlichen Kosten und Nutzen eines EHS zu bewerten und die Auswirkungen auf verschiedene Akteure zu analysieren.

Die Ergebnisse dieser Modelle variieren, aber viele zeigen, dass EHS einen signifikanten Beitrag zur Reduktion der Treibhausgasemissionen leisten. Zhang et al. (2022) untersuchten den Einfluss des Kohlenstoffemissionshandelssystems auf die technologische Innovation von Unternehmen (Dong et al., 2024), was die breitere Wirkung dieser Instrumente unterstreicht, die über die reine Emissionsminderung hinausgeht und die Transformation zu einer nachhaltigeren Wirtschaft fördert.

5.4. Diskussion von Kontroversen und Kritik an der Wirksamkeit

Trotz der positiven empirischen Belege gibt es auch Kritik und Kontroversen hinsichtlich der Wirksamkeit von EHS (Pearse & Böhm, 2014). * **Überangebot und niedrige Preise:** In den Anfangsphasen des EU ETS führte ein Überangebot an Berechtigungen zu unwirksam niedrigen Preisen, was die Anreizwirkung untergrub. Kritiker argumentieren, dass dies die Glaubwürdigkeit des Systems beschädigt hat und dass die Reduktionen möglicherweise auch ohne EHS stattgefunden hätten (Pearse & Böhm, 2014). Die Einführung der MSR und die Straffung des Caps waren Reaktionen auf diese Kritik und haben die Preise seitdem deutlich erhöht. * **Carbon Leakage:** Die Sorge vor der Verlagerung von Emissionen in andere Länder bleibt ein Diskussionspunkt, obwohl Studien zeigen, dass die tatsächlichen Effekte oft geringer sind als befürchtet (Rose, 1987). Der CBAM ist ein Versuch, dieses Problem proaktiv anzugehen (Wettestad, 2023), indem er gleiche Wettbewerbsbedingungen schafft und den Anreiz zur Verlagerung reduziert. * **Windfall-Profits:** Die kostenlose Zuteilung von Berechtigungen führte in einigen Fällen zu unerwarteten Gewinnen für Unternehmen, insbesondere im Stromsektor, die die Kosten der (kostenlos erhaltenen) Berechtigungen auf ihre Kunden umlegten. Dies wird als ineffizient und ungerecht kritisiert, da es nicht dem Prinzip der Verursacherhaftung entspricht und die Lenkungswirkung des Preises verzerrt. * **Volatilität:** Die Preisschwankungen können die langfristige Planung für Unternehmen erschweren, was zu Investitionsunsicherheit führt. Marktstabilitätsmechanismen sollen diese Volatilität reduzieren, indem sie extreme Preisspitzen und -tiefen abfedern. * **Komplexität und Governance:** Die Verwaltung komplexer Handelssysteme erfordert robuste Institutionen und eine effektive Governance, um Betrug, Marktmanipulation und rechtliche Anfechtungen zu verhindern (Weishaar, 2014). Die Transaktionskosten und der administrative Aufwand können insbesondere für kleinere Unternehmen eine Herausforderung darstellen.

Diese Kritikpunkte sind jedoch oft Ansatzpunkte für Verbesserungen und Reformen der EHS, anstatt grundlegende Ablehnungen des Konzepts. Die kontinuierliche Weiterentwicklung und Anpassung der Systeme ist entscheidend, um ihre Wirksamkeit zu maximieren und auf

neue Herausforderungen zu reagieren, wodurch die anfänglichen Mängel behoben und die Systeme robuster gestaltet werden.

5.5. Ausblick auf zukünftige Forschung und Politikempfehlungen basierend auf empirischen Daten

Basierend auf den empirischen Belegen ergeben sich mehrere wichtige Schlussfolgerungen und Empfehlungen für zukünftige Forschung und Politikgestaltung:

- * **Stringenz des Caps:** Die empirischen Daten unterstreichen die Notwendigkeit eines stringenten und glaubwürdigen Caps, das über die Zeit hinweg kontinuierlich reduziert wird, um langfristige Anreize für Emissionsreduktionen zu schaffen. Ein zu laxes Cap untergräbt die Wirksamkeit des gesamten Systems.
- * **Designmerkmale:** Die Implementierung von Marktstabilitätsmechanismen (wie die MSR) und die schrittweise Umstellung auf Auktionierung sind entscheidend für die Preisbildung und die Effizienz des Systems. Diese Merkmale tragen dazu bei, Preisvolatilität zu reduzieren und die Glaubwürdigkeit des Preissignals zu stärken.
- * **Umfassende Abdeckung:** Die Ausweitung von EHS auf weitere Sektoren, wie im EU ETS mit der geplanten Einbeziehung von Gebäuden und Verkehr, kann die Gesamtwirkung verstärken und die Kosteneffizienz erhöhen, indem mehr Emissionsquellen in das System integriert werden.
- Internationale Zusammenarbeit:** Die Verknüpfung von EHS zwischen verschiedenen Jurisdiktionen, wie zwischen Kalifornien und Québec, kann die Marktgröße erhöhen, die Liquidität verbessern und die Effizienz der Emissionsminderung weltweit steigern (Gao, 2024)(Will, 2019). Solche Verknüpfungen fördern auch den Wissensaustausch und die Harmonisierung von Klimapolitiken.
- * **Soziale Gerechtigkeit:** Die Einnahmen aus der CO2-Bepreisung sollten gezielt zur Abmilderung sozialer Härten und zur Förderung eines gerechten Übergangs eingesetzt werden, um die politische Akzeptanz zu sichern (Tol, 2001). Dies kann durch direkte Rückerstattungen oder gezielte Investitionen in energieeffiziente Maßnahmen für einkommensschwache Haushalte erfolgen.
- * **Komplementäre Politik:** EHS sollten nicht als isoliertes Instrument betrachtet werden, sondern als Teil eines umfassenden Klimapolitik-

pakets, das durch Standards, Subventionen und F&E-Förderung ergänzt wird (Kirchner et al., 2019). Eine integrierte Strategie kann die Synergien zwischen verschiedenen Instrumenten nutzen und die Transformation beschleunigen.

Zukünftige Forschung sollte sich weiterhin auf die Feinabstimmung der Systemdesigns, die Bewertung der langfristigen Auswirkungen auf Innovation und Wettbewerbsfähigkeit sowie die Analyse der Wechselwirkungen mit anderen Politikmaßnahmen konzentrieren. Insbesondere die Untersuchung der neuen und sich entwickelnden EHS in Schwellenländern, wie dem chinesischen ETS, wird von großer Bedeutung sein, um die globalen Klimaziele zu erreichen. Die empirischen Belege liefern eine solide Grundlage für die Annahme, dass CO2-Handelssysteme ein mächtiges und flexibles Instrument im Kampf gegen den Klimawandel darstellen können, sofern sie kontinuierlich evaluiert und angepasst werden.

Diskussion

Die vorliegende Arbeit hat die Mechanismen, die Wirksamkeit und die Herausforderungen des Emissionshandels als zentrales Instrument der Klimapolitik detailliert untersucht. Die gewonnenen Erkenntnisse beleuchten sowohl das transformative Potenzial als auch die inhärenten Komplexitäten dieses marktgestützten Ansatzes zur Dekarbonisierung. Diese Diskussion zielt darauf ab, die Hauptbefunde in einen breiteren Kontext einzuordnen, ihre Implikationen für die Klimapolitik zu erörtern, die Grenzen und Herausforderungen des Emissionshandels kritisch zu reflektieren, konkrete Verbesserungsvorschläge für CO2-Märkte zu unterbreiten, die Rolle dieser Mechanismen im globalen Klimaschutz zu beleuchten und schließlich Empfehlungen für Politik und Wirtschaft abzuleiten. Die Ergebnisse bestätigen die grundlegende Prämisse, dass ein effizient gestalteter Emissionshandel ein kosteneffektives Mittel zur Emissionsreduktion darstellen kann, jedoch sind seine Wirksamkeit und Akzeptanz stark von Designmerkmalen, der politischen Steuerung und der Fähigkeit zur Anpassung an dynamische Marktbedingungen abhängig.

Implikationen für Klimapolitik

Die Ergebnisse dieser Untersuchung unterstreichen die zentrale Rolle des Emissionshandels als Eckpfiler einer effektiven Klimapolitik. Die Fähigkeit, Emissionen über einen marktwirtschaftlichen Ansatz zu bepreisen, hat sich als mächtiges Instrument erwiesen, um Anreize für technologische Innovationen und Verhaltensänderungen in emissionsintensiven Sektoren zu schaffen (Edwin & Josephine, 2023)(Li & Zhao, 2025). Die Einführung eines CO₂-Preises über einen Emissionshandel setzt ein klares Signal an Unternehmen und Verbraucher, dass die externen Kosten von Emissionen internalisiert werden müssen. Dies führt zu einer Neubewertung von Investitionen, Produktionsprozessen und Konsummustern, die langfristig zu einer kohlenstoffärmeren Wirtschaft führen kann. Die Effizienz dieses Instruments liegt in seiner Flexibilität: Es ermöglicht den Akteuren, die kostengünstigsten Reduktionsmaßnahmen zu identifizieren und umzusetzen, anstatt auf starre ordnungsrechtliche Vorgaben angewiesen zu sein (Piga, 2003).

Die Erfahrungen mit bestehenden Emissionshandelssystemen, wie dem EU-Emissionshandelssystem (EU-EHS), zeigen, dass ein solcher Mechanismus nicht isoliert betrachtet werden kann, sondern in ein umfassendes Paket von Klimaschutzmaßnahmen eingebettet sein muss (Kirchner et al., 2019). Eine erfolgreiche Klimapolitik erfordert eine kohärente Kombination aus CO₂-Bepreisung, Förderprogrammen für erneuerbare Energien, Energieeffizienzstandards und Forschung & Entwicklung. Die Synergien zwischen diesen Instrumenten sind entscheidend, um sowohl die Kosteneffizienz als auch die transformativen Effekte zu maximieren. Beispielsweise können Investitionen in erneuerbare Energien, die durch Subventionen oder steuerliche Anreize gefördert werden, die Nachfrage nach Emissionszertifikaten reduzieren und somit den CO₂-Preis stabilisieren oder senken, was wiederum die Akzeptanz des Systems erhöht. Umgekehrt kann ein hoher CO₂-Preis die Wirtschaftlichkeit von Investitionen in grüne Technologien verbessern und somit die Notwendigkeit direkter Subventionen über die Zeit reduzieren.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Gestaltung der Zertifikatsallokation. Die Art und Weise, wie Emissionszertifikate anfänglich an die Emittenten verteilt werden - sei es durch Auktionierung, kostenlose Zuteilung oder eine Kombination aus beidem - hat signifikante Auswirkungen auf die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen, die Verteilungswirkungen und die Einnahmen für den Staat (Goulder et al., 2009). Eine zunehmende Auktionierung von Zertifikaten, wie sie im EU-EHS stattfindet, erhöht nicht nur die Transparenz und reduziert das Risiko von Übergewinnen, sondern generiert auch erhebliche Einnahmen, die für weitere Klimaschutzmaßnahmen oder zur Entlastung der Bürger verwendet werden können. Dies schafft eine wichtige politische Rückkopplungsschleife, bei der die Einnahmen aus der CO₂-Bepreisung direkt in die Transformation investiert werden können, was die Legitimität des Systems stärkt.

Die langfristige Planbarkeit und die Stabilität des regulatorischen Rahmens sind von größter Bedeutung für die Wirksamkeit des Emissionshandels. Unternehmen benötigen klare Signale und Planungssicherheit, um langfristige Investitionen in emissionsarme Technologien tätigen zu können (Ladaniwskyj, 2008). Häufige Änderungen der Regeln oder Unsicherheiten bezüglich der zukünftigen Knappheit von Zertifikaten können Investitionen hemmen und die Effizienz des Marktes untergraben. Dies erfordert eine vorausschauende Politik, die sich an wissenschaftlichen Erkenntnissen orientiert und gleichzeitig flexibel genug ist, um auf unvorhergesehene Entwicklungen reagieren zu können. Die Festlegung eines langfristigen Reduktionspfades mit regelmäßigen Anpassungen des Caps (Obergrenze der Emissionen) ist hierfür ein bewährtes Mittel (Oberthür & Ott, 1999).

Die Implikationen erstrecken sich auch auf die internationale Dimension. Der Erfolg nationaler oder regionaler Emissionshandelssysteme kann als Blaupause für die Entwicklung ähnlicher Mechanismen in anderen Teilen der Welt dienen (Gao, 2024). Die Möglichkeit der Verknüpfung von Emissionshandelssystemen (Linkage) bietet das Potenzial, die Effizienz des Klimaschutzes global zu steigern, indem Reduktionsmaßnahmen dort umgesetzt werden, wo sie am kostengünstigsten sind. Dies fördert den Technologietransfer und die internationale

Zusammenarbeit im Kampf gegen den Klimawandel. Die Ergebnisse betonen, dass eine robuste Klimapolitik, die den Emissionshandel integriert, nicht nur zur Erreichung von Emissionszielen beiträgt, sondern auch positive Nebeneffekte wie Innovationsförderung, Energieunabhängigkeit und verbesserte Luftqualität mit sich bringen kann (Reid, 2022).

Die politische Akzeptanz und die Kommunikation der Vorteile des Emissionshandels sind ebenfalls entscheidende Implikationen. Oft wird der CO₂-Preis als zusätzliche Belastung wahrgenommen. Eine transparente Darstellung der Einnahmenverwendung, der positiven Umweltauswirkungen und der langfristigen wirtschaftlichen Chancen kann die öffentliche Unterstützung stärken. Die Forschung zeigt, dass eine sorgfältige Gestaltung der Kompensationsmechanismen für potenziell Benachteiligte - z.B. Haushalte mit niedrigem Einkommen oder besonders betroffene Industrien - unerlässlich ist, um soziale Ungleichheiten zu minimieren und die Legitimität des Instruments zu wahren (Tol, 2001).

Grenzen und Herausforderungen des Emissionshandels

Trotz seines Potenzials ist der Emissionshandel mit einer Reihe signifikanter Grenzen und Herausforderungen konfrontiert, die seine Wirksamkeit und Akzeptanz beeinträchtigen können. Eine der prominentesten Herausforderungen ist die **Preisvolatilität** auf dem CO₂-Markt (Ladaniwskyj, 2008)(Dittmann et al., 2024). Schwankende Preise für Emissionszertifikate können die Investitionssicherheit für Unternehmen untergraben. Wenn der Preis zu niedrig ist, fehlen die Anreize für kostspielige Dekarbonisierungsmaßnahmen; ist er zu hoch, kann dies zu Wettbewerbsnachteilen und wirtschaftlicher Belastung führen. Diese Volatilität resultiert oft aus externen Schocks wie Wirtschaftskrisen, unerwarteten politischen Entscheidungen oder Änderungen in der Energiepolitik, die die Nachfrage nach Zertifikaten beeinflussen. Die mangelnde Vorhersagbarkeit der CO₂-Preise erschwert es Unternehmen, langfristige Investitionen in grüne Technologien zu planen, da die Rentabilität dieser Investitionen stark vom zukünftigen CO₂-Preis abhängt.

Ein weiteres kritisches Problem ist das **Carbon Leakage** (Kohlenstoffleckage) (Wettesstad, 2023). Dies beschreibt das Phänomen, dass Unternehmen ihre Produktion in Länder mit weniger strengen Klimaschutzauflagen verlagern, um die Kosten für Emissionszertifikate zu vermeiden. Dies führt nicht nur zu einem Verlust von Arbeitsplätzen und Wirtschaftsleistung im regulierten Gebiet, sondern kann auch die globalen Emissionen nicht reduzieren, sondern lediglich verlagern. Der Emissionshandel muss daher Mechanismen zur Verhinderung von Carbon Leakage implementieren, wie beispielsweise kostenlose Zuteilung von Zertifikaten für besonders gefährdete Sektoren oder den Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) der EU, der Importe aus Nicht-EU-Ländern mit einem CO2-Preis belegt. Diese Maßnahmen sind jedoch selbst komplex und können zu internationalen Handelsstreitigkeiten führen.

Die **Allokationsfragen** stellen eine weitere Herausforderung dar. Die initiale Verteilung von Emissionszertifikaten ist ein politisch sensibler Prozess, der über Gewinner und Verlierer entscheidet (Goulder et al., 2009). Eine zu großzügige kostenlose Zuteilung in der Vergangenheit hat in einigen Systemen zu einem Überangebot an Zertifikaten geführt, was den CO2-Preis gedrückt und die Anreizwirkung gemindert hat. Umgekehrt kann eine zu restriktive Zuteilung kleine und mittlere Unternehmen unverhältnismäßig belasten. Die Gerechtigkeit und Effizienz der Allokation bleiben ein ständiger Diskussionspunkt. Zudem kann die Komplexität der Regeln und die Überwachung der Einhaltung (Monitoring, Reporting, Verification - MRV) für Unternehmen, insbesondere für kleinere Betriebe, eine erhebliche administrative Belastung darstellen (Weishaar, 2014).

Soziale Gerechtigkeit und Verteilungswirkungen sind ebenfalls von großer Bedeutung. Ein steigender CO2-Preis kann zu höheren Kosten für Energie, Heizung und Transport führen, was insbesondere Haushalte mit geringem Einkommen unverhältnismäßig stark belasten kann. Dies kann zu sozialer Ungleichheit führen und die Akzeptanz des Emissionshandels in der Bevölkerung untergraben. Politische Maßnahmen zur Kompensation dieser Effekte, wie die Rückverteilung von Einnahmen an die Bürger oder gezielte Förderprogramme für energieeffiziente Modernisierungen, sind notwendig, um eine gerechte

Energiewende zu gewährleisten (Tol, 2001). Ohne solche Maßnahmen besteht die Gefahr von sozialem Widerstand, wie er in anderen Kontexten der Umweltbesteuerung beobachtet wurde.

Einige Kritiker bezweifeln grundsätzlich die Fähigkeit von CO2-Märkten, einen radikalen Wandel herbeizuführen (Pearse & Böhm, 2014). Sie argumentieren, dass die marktbasierteren Mechanismen zu langsam sind, um die notwendige Geschwindigkeit der Dekarbonisierung zu erreichen, die zur Einhaltung der Pariser Klimaziele erforderlich ist. Sie weisen darauf hin, dass der Kapitalismus von Natur aus auf Wachstum ausgerichtet ist, und dass ein Preis auf Kohlenstoff allein nicht ausreicht, um die tiefgreifenden systemischen Veränderungen herbeizuführen, die für eine echte Nachhaltigkeit notwendig wären. Zudem besteht die Gefahr, dass der Emissionshandel als “Ablasshandel” wahrgenommen wird, der es Unternehmen ermöglicht, ihre Emissionen fortzusetzen, solange sie dafür bezahlen, anstatt echte strukturelle Veränderungen vorzunehmen.

Die **politische Durchsetzbarkeit und rechtliche Herausforderungen** dürfen ebenfalls nicht unterschätzt werden. Die Schaffung und Anpassung von Emissionshandelssystemen erfordert komplexe Gesetzgebung und kann Gegenstand von Klagen und politischem Widerstand sein (Weishaar, 2014). Die Notwendigkeit internationaler Koordination bei der Verknüpfung von Systemen oder der Implementierung von Grenzausgleichsmechanismen erhöht die Komplexität zusätzlich. Nationale Interessen und unterschiedliche Ambitionsniveaus können die Harmonisierung und Expansion von CO2-Märkten erheblich erschweren (Gao, 2024).

Schließlich ist die **Begrenzung des Geltungsbereichs** eine weitere Grenze. Viele Emissionshandelssysteme decken nur einen Teil der gesamten Volkswirtschaft ab, typischerweise energieintensive Industrien und den Energiesektor. Andere Sektoren wie Verkehr, Landwirtschaft und Gebäude, die ebenfalls erhebliche Emissionen verursachen, sind oft ausgenommen oder werden durch separate Politiken reguliert. Dies kann zu Verzerrungen

führen und die Gesamteffizienz des Klimaschutzes mindern. Eine Ausweitung des Geltungsbereichs ist wünschenswert, stößt aber auf erhebliche politische und technische Hürden.

Verbesserungsvorschläge für CO2-Märkte

Angesichts der identifizierten Grenzen und Herausforderungen gibt es eine Reihe von Verbesserungsvorschlägen, die die Effektivität und Akzeptanz von CO2-Märkten steigern könnten. Ein zentraler Ansatzpunkt ist die **Stabilisierung des CO2-Preises**. Um die Volatilität zu reduzieren und Investitionssicherheit zu gewährleisten, könnten Mechanismen wie Preisunter- und -obergrenzen (Price Collars) implementiert werden (Holt & Shobe, 2015). Eine Preisuntergrenze würde sicherstellen, dass der CO2-Preis nicht unter ein bestimmtes Niveau fällt, was die Anreize für Dekarbonisierung auch in Zeiten wirtschaftlicher Abschwünge aufrechterhält. Eine Preisobergrenze könnte extreme Preisausschläge nach oben begrenzen, um die Wettbewerbsfähigkeit der Industrie zu schützen und soziale Härten zu vermeiden. Der EU-EHS hat mit der Marktstabilitätsreserve (MSR) bereits einen Mechanismus zur Steuerung des Zertifikatsangebots eingeführt, um ein strukturelles Überangebot abzubauen und den Markt widerstandsfähiger gegen Schocks zu machen (Mauer et al., 2020). Eine dynamischere Anpassung der MSR-Parameter könnte die Preisstabilität weiter verbessern.

Die **Allokationsmethoden** sollten kontinuierlich überprüft und angepasst werden. Eine schrittweise Erhöhung des Anteils der Auktionierung von Zertifikaten ist anzustreben, um Transparenz zu erhöhen, Übergewinne zu vermeiden und Staatseinnahmen zu generieren, die für Klimaschutzinvestitionen oder zur Entlastung der Bürger genutzt werden können (Goulder et al., 2009). Für Sektoren, die einem hohen Risiko von Carbon Leakage ausgesetzt sind, müssen weiterhin geeignete Schutzmechanismen existieren, die jedoch zeitlich begrenzt und an klare Bedingungen geknüpft sein sollten, um langfristig Anreize zur Dekarbonisierung zu erhalten. Der EU-CBAM ist ein vielversprechender Ansatz, um Carbon Leakage zu begegnen, muss aber sorgfältig implementiert und international abgestimmt werden, um Handelskonflikte zu minimieren (Wettestad, 2023).

Eine **Ausweitung des Geltungsbereichs** auf weitere Sektoren, wie den Gebäude-sektor und den Verkehr, ist entscheidend, um die Gesamtwirkung des Emissionshandels zu maximieren und die Reduktionslast gerechter zu verteilen. Dies erfordert jedoch eine sorgfältige Gestaltung, um administrative Komplexität und soziale Härten zu vermeiden. Separate, möglicherweise gestaffelte oder regional angepasste Systeme könnten in Betracht gezogen werden, um den spezifischen Gegebenheiten dieser Sektoren Rechnung zu tragen. Die Integration dieser Sektoren bietet ein erhebliches zusätzliches Reduktionspotenzial und würde die Kohärenz der Klimapolitik stärken.

Die **Governance und Transparenz** des Emissionshandels müssen kontinuierlich verbessert werden. Dies umfasst eine klare Kommunikation der politischen Ziele, der Marktregeln und der erzielten Fortschritte. Eine unabhängige Aufsichtsbehörde könnte die Integrität des Marktes gewährleisten und Manipulationen oder Insiderhandel verhindern. Zudem sollte die Datenverfügbarkeit und -qualität verbessert werden, um eine präzise Überwachung, Berichterstattung und Verifizierung der Emissionen zu ermöglichen (Haque, 2023). Regelmäßige Überprüfungen und Anpassungen des Systems auf Basis wissenschaftlicher Erkenntnisse und gesammelter Erfahrungen sind unerlässlich.

Internationale Kooperation und Verknüpfung von CO₂-Märkten bieten ein enormes Potenzial zur Effizienzsteigerung. Die Schaffung von Linkages zwischen nationalen oder regionalen Emissionshandelssystemen könnte zu einem breiteren, liquideren Markt führen, die CO₂-Preise harmonisieren und die globalen Reduktionskosten senken (Gao, 2024). Dies erfordert jedoch ein hohes Maß an Vertrauen, Harmonisierung der Regeln und gegenseitiger Anerkennung der Zertifikate. Das Pariser Abkommen bietet hierfür mit Artikel 6 einen Rahmen, der die Zusammenarbeit bei der Emissionsminderung ermöglicht und die Entwicklung robuster internationaler Kohlenstoffmärkte fördern soll (Ramji, 2018).

Schließlich sollten die **Einnahmen aus dem Emissionshandel strategisch eingesetzt** werden. Anstatt die Einnahmen einfach in den allgemeinen Haushalt fließen zu lassen, könnten sie gezielt zur Förderung von Innovationen in kohlenstoffarmen Technologien, zur

Unterstützung sozialer Ausgleichsmaßnahmen oder zur Finanzierung von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel verwendet werden. Eine transparente und zweckgebundene Verwendung der Einnahmen kann die politische Akzeptanz des Systems erhöhen und gleichzeitig die Transformation zu einer nachhaltigen Wirtschaft beschleunigen. Dies schafft eine direkte Verbindung zwischen der Belastung durch den CO₂-Preis und den Vorteilen des Klimaschutzes, was die Legitimität des Gesamtansatzes stärkt.

Rolle im globalen Klimaschutz

Der Emissionshandel spielt eine immer wichtigere Rolle im globalen Klimaschutz und wird zunehmend als ein Schlüsselmechanismus zur Erreichung der Ziele des Pariser Abkommens anerkannt. Das Abkommen selbst ermutigt die Vertragsparteien, marktbasierter Ansätze zu nutzen, um ihre National Determined Contributions (NDCs) zu erfüllen, insbesondere durch Artikel 6, der die internationale Zusammenarbeit bei Emissionsminderungen ermöglicht (Ramji, 2018). Dies eröffnet die Möglichkeit für die Verknüpfung von Emissionshandelssystemen (ETS) und für den Handel mit international transferierten Minderungsergebnissen (ITMOs). Solche Mechanismen können die globale Effizienz der Emissionsreduktion erheblich steigern, indem sie es ermöglichen, Reduktionspotenziale dort zu heben, wo sie am kostengünstigsten sind, und gleichzeitig den Technologietransfer in Entwicklungsländer zu fördern (Gao, 2024).

Die Erfahrungen mit etablierten Systemen wie dem EU-EHS dienen als wichtige Referenzpunkte und Lehrmeister für aufstrebende CO₂-Märkte weltweit. Länder wie China, Südkorea und verschiedene Regionen Nordamerikas haben eigene Emissionshandelssysteme implementiert oder befinden sich in der Aufbauphase. Diese Verbreitung unterstreicht die wachsende Erkenntnis, dass ein Preis auf Kohlenstoff ein unverzichtbarer Bestandteil einer umfassenden Klimastrategie ist. Die Diversität dieser Systeme bietet jedoch auch Herausforderungen in Bezug auf Kompatibilität und Harmonisierung, die für eine effektive internationale Verknüpfung überwunden werden müssen. Eine globale Konvergenz der

Standards für Messung, Berichterstattung und Verifizierung (MRV) sowie für die Governance ist entscheidend, um Doppelzählungen zu vermeiden und die Integrität des globalen Kohlenstoffmarktes zu gewährleisten (Janikowski et al., 1994).

Der Emissionshandel kann auch eine wichtige Rolle bei der Mobilisierung von privaten Investitionen in den Klimaschutz spielen. Indem er einen klaren finanziellen Anreiz für Emissionsreduktionen setzt, zieht er Kapital in Sektoren und Projekte, die zur Dekarbonisierung beitragen. Dies ist besonders relevant für Entwicklungsländer, die oft auf internationale Finanzierung angewiesen sind, um ihre Klimaziele zu erreichen. Durch die Schaffung eines funktionierenden Kohlenstoffmarktes können diese Länder ihre Attraktivität für grüne Investitionen steigern und gleichzeitig eine nachhaltige wirtschaftliche Entwicklung fördern.

Es ist jedoch auch wichtig zu erkennen, dass der Emissionshandel allein keine Lösung für alle Aspekte des globalen Klimaschutzes darstellt. Er muss durch andere Maßnahmen ergänzt werden, wie die Förderung von Forschung und Entwicklung im Bereich sauberer Technologien, die Beseitigung von Subventionen für fossile Brennstoffe und die Stärkung der Resilienz gegenüber den Auswirkungen des Klimawandels. Die globale Klimapolitik ist ein komplexes Geflecht aus nationalen und internationalen Anstrengungen, in dem der Emissionshandel eine mächtige, aber nicht die einzige Komponente ist (Guest, 2010). Die Herausforderung besteht darin, die verschiedenen Instrumente so zu koordinieren, dass sie sich gegenseitig verstärken und einen kohärenten und ambitionierten globalen Klimaschutzpfad ermöglichen.

Die Rolle des Emissionshandels im globalen Klimaschutz wird auch durch das Konzept der “gerechten Transformation” beeinflusst. Dies bedeutet, dass die Umstellung auf eine kohlenstoffarme Wirtschaft sozial gerecht gestaltet werden muss, insbesondere in Ländern, die stark von der fossilen Brennstoffindustrie abhängig sind. Internationale Unterstützung und Mechanismen zur Kompensation von Übergangsverlusten können dazu beitragen, die Akzeptanz von Emissionshandelssystemen in diesen Regionen zu erhöhen und eine reibungslose Integration in globale Klimaschutzbemühungen zu ermöglichen. Die Fähigkeit des Emission-

shandels, einen wirksamen und gleichzeitig flexiblen Rahmen für die Emissionsreduktion zu bieten, macht ihn zu einem unverzichtbaren Instrument im globalen Werkzeugkasten gegen den Klimawandel.

Empfehlungen für Politik und Wirtschaft

Aus den gewonnenen Erkenntnissen lassen sich konkrete Empfehlungen für politische Entscheidungsträger und Wirtschaftsakteure ableiten, um die Wirksamkeit und Akzeptanz des Emissionshandels weiter zu stärken und seinen Beitrag zum Klimaschutz zu maximieren.

Für die Politik:

1. **Langfristige Planung und Stabilität:** Die Politik sollte einen klaren, langfristigen Reduktionspfad für die Obergrenze des Emissionshandels festlegen, der mit den nationalen und internationalen Klimazielen (z.B. Pariser Abkommen) übereinstimmt. Dies schafft Planungs- und Investitionssicherheit für die Wirtschaft (Oberthür & Ott, 1999). Regelmäßige, wissenschaftsbasierte Überprüfungen und Anpassungen des Systems sind notwendig, sollten aber transparent und mit ausreichend Vorlauf kommuniziert werden.
2. **Preisstabilität durch Marktinstrumente:** Einführung oder Stärkung von Mechanismen zur Preisstabilisierung, wie dynamische Preisuntergrenzen und -obergrenzen (Price Collars) oder eine verbesserte Marktstabilitätsreserve (Holt & Shobe, 201

Literaturverzeichnis

[Wird automatisch generiert]